



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

## EFEITO DE ESCALA EM GEOMATERIAIS GRANÍTICOS

FILIPE MIGUEL SANTOS NUNES

Dissertação apresentada para obtenção  
do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Covilhã

Julho 2009



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

## EFEITO DE ESCALA EM GEOMATERIAIS GRANÍTICOS

FILIPE MIGUEL SANTOS NUNES

Orientador:

Professor Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro

Dissertação apresentada para obtenção

do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Covilhã

Julho 2009

## AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar os seus sinceros agradecimentos à Universidade da Beira Interior, em concreto ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, pela disponibilidade do laboratório e equipamentos que permitiram realizar todos os ensaios laboratoriais.

Em particular, o autor agradece:

- Ao Professor Doutor Victor Cavaleiro, orientador deste estudo, por todos os ensinamentos, incentivos e acompanhamento crítico que soube transmitir.
- Ao Professor Doutor Pedro Almeida, pelo ensino da técnica de instrumentação de provetes e pela ajuda na preparação e execução dos ensaios laboratoriais de compressão uniaxial com extensometria eléctrica.
- Aos colegas de trabalho (Eng.º José Riscado e Eng.º João Rodrigues), por toda a cooperação e compreensão prestada no decorrer da elaboração deste estudo.
- Aos meus Pais, por tudo o que fizeram e fazem por mim.
- À minha cara-metade, que contribuiu de uma forma incasável para a realização deste estudo e teve sempre presente em todas as etapas importantes.
- A todos aqueles que de forma directa ou indirecta contribuíram, em maior ou menor grau, para a conclusão deste estudo.

## **RESUMO**

O presente estudo, pretende contribuir para um melhor esclarecimento, no que concerne à variação da resistência com a mudança da geometria de amostras de materiais rochosos, assim como constatar a influência do efeito de escala na caracterização de maciços rochosos, neste caso maciços graníticos. Com este objectivo foram ensaiados em laboratório de 127 provetes de granito com diferentes geometrias. Destas 127 amostras, 103 são provenientes de um afloramento granítico de grão médio a fino de tendência porfiróide, na região de Freixedas (Pinhel), a restante amostragem foi recolhida de uma sondagem à rotação num afloramento de granito porfiróide de grão grosseiro a médio, na região do Cró (Sabugal). Determinaram-se as características físicas, tais como: densidade aparente, absorção de água, porosidade aberta e velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. Em relação às propriedades mecânicas, realizou-se o ensaio de resistência à compressão uniaxial com recurso a extensometria completa de forma a avaliar a deformabilidade das diferentes amostras. Após realização dos ensaios foram confrontados os dados de forma a determinar os parâmetros em função geometria, e poder estabelecer relações entre os diferentes parâmetros geomecânicos.

### **Palavras-chave:**

Granito;

Porosidade

Absorção de água

Resistência à compressão uniaxial

Efeito de escala

## **ABSTRACT**

The present work, intends to contribute to a better explanation, concerning the variation of uniaxial compressive strength obtained in the laboratory with the variation of the geometry of the samples, as well as to note the influence of the scale effect in the characterization of rock massifs, in this case granitic massifs. With this purpose, 127 samples of granite with different geometries were tested in the laboratory. Of these 127 samples, 103 are originally from a granitic afloration of median to fine size grain porphyritic from the region of Freixedas (Pinhel), the remaining sample was gathered by a sounding to the rotation of an afloration from granite porphyritic of thick to median grain, in the region of the Cró (Sabugal). The characteristics, such as physical were determined: apparent density, absorption of water, porosity and sound velocity (Pundit test). Regarding the mechanical properties, tests were realized, to the uniaxial compressive strength with resource to the complete extensometer sets in order to evaluate the deformability of the different samples. After the tests, the data was analyzed to determine the variation of the resistance to the uniaxial compression of the sample according to its geometry, and to be able to establish relations between the different geomechanical parameters.

### **Keywords:**

Granite  
Porosity  
Absorption of water  
Uniaxial compressive strength  
Scale effect

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objectivo da dissertação .....	5
1.2 Estrutura da dissertação .....	5
2. ANÁLISE E CARATERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	6
2.1 Ensaio para caracterização de maciços .....	6
2.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais rochosos .....	8
2.2.1 Propriedades físicas.....	10
2.2.1.1 Peso específico ( $\gamma$ ).....	10
2.2.1.2 Densidade aparente, $\rho_a$ .....	10
2.2.1.3 Absorção de água $A$ .....	12
2.2.1.4 Porosidade ( $\eta$ ) .....	12
2.2.1.5 Permeabilidade ( $k$ ).....	14
2.2.1.6 Durabilidade.....	17
2.2.1.7 Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.....	18
2.2.2 Propriedades mecânicas.....	19
2.2.2.1 Ensaio de compressão uniaxial (UCS) .....	20
2.3 Efeito de escala e resistência.....	26
3. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA APLICADA .....	36
3.1 Amostragem, localização e enquadramento geológico.....	36
3.2 Verificação das dimensões e paralelismo dos provetes .....	42
3.3 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	44
3.4 Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas .....	46
3.5 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade .....	50

4.	ANÁLISE E TRATAMENTO DOS RESULTADOS.....	58
4.1	Resultados obtidos nos provetes do grupo (A) .....	58
4.2	Resultados obtidos nos provetes do grupo (B) .....	60
4.3	Resultados obtidos nos provetes do grupo (C) .....	63
4.4	Resultados obtidos nos provetes do grupo (D) .....	65
4.5	Resultados obtidos nos provetes do grupo (E) .....	67
4.6	Resultados obtidos nos provetes do grupo (F) .....	70
4.7	Resultados obtidos nos provetes do grupo (G).....	72
4.8	Resultados obtidos nos provetes do grupo (H) .....	75
4.9	Resultados obtidos nos provetes do grupo (I).....	78
4.10	Resultados obtidos nos provetes do grupo (J) .....	80
4.11	Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1) .....	83
4.12	Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5) .....	85
4.13	Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2) .....	87
4.14	Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5) .....	90
4.15	Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3) .....	92
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
	BIBLIOGRAFIA .....	97
	ANEXOS	

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Curva típica de tensão-deformação. (L – altura do provete; D – comprimento da aresta da base ou diâmetro do provete; $F_c$ – força de compressão aplicada ao provete; $\varepsilon_L$ – extensões longitudinais; $\varepsilon_T$ – extensões transversais; $\sigma_c$ – resistência à compressão uniaxial; A – área de aplicação da força; E – módulo de elasticidade; $\nu$ – Coeficiente de Poisson).....	21
Figura 2 -Esquema de extracção de corpos de prova, orientados a partir de um bloco. (adaptado: Ladeira, 1986).....	22
Figura 3 – Transição entre a rocha intacta e o maciço rochoso muito fracturado tendo em conta o tamanho da amostra analisada. (Hoek, <i>et al</i> 2002). ....	26
Figura 4 – Variação da resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos de carvão, $\sigma_c$ , com o comprimento da aresta dos provetes. (adaptado: Bieniawski, 1969).....	30
Figura 5 – Variação da resistência à compressão uniaxial com a modificação das dimensões das amostras (Charrua-Graça, 1986).....	31
Figura 6 – Variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria dos provetes ensaiados. (Matilde M.H., 2000) .....	32
Figura 7 – Variação da resistência à compressão simples com o aumento da esbelteza dos provetes. (adaptado: Vallejo, 2002). ....	33
Figura 8 - Variação da resistência à compressão simples com o aumento do provete. (adaptado: Vallejo, 2002).....	33
Figura 9 – Relação altura/diâmetro (L/D) e a resistência à compressão simples de provetes de granito. (Mogi, 1966, adaptado: <i>in</i> Ladeira, 1986). ....	34
Figura 10 – Enquadramento geográfico dos locais de amostragem. ....	37
Figura 11 – Obtenção de um grande bloco de “granito Ricão” na pedreira, (Amostragem 1).....	37
Figura 12 – Localização geográfica da amostragem 1. (extracto da carta militar n.º 182, IGeoE).....	38
Figura 13 – Enquadramento geológico da amostra 1. (Extracto da carta geológica n.º 18A, IGM). ....	38
Figura 14 – Localização geográfica da amostragem 2. (extracto da carta militar n.º 215, IGeoE).....	39
Figura 15 – Enquadramento geológico da amostragem 2. (Extracto da carta geológica n.º 18C, IGM). ....	39
Figura 16 – Caixa nº 15 da sondagem à rotação AC1 – Cró. ....	40
Figura 17 – Preparação e corte dos provetes da amostragem 2. ....	40

Figura 18 – Mostra de provetes obtidos da amostragem 1.....	42
Figura 19 – Mostra de provetes obtidos da amostragem 2.....	42
Figura 20 – Verificação do comprimento das arestas do provete, com ajuda do paquímetro.....	43
Figura 21 – Verificação dos ângulos entre as faces dos provetes para verificar o paralelismo com ajuda do goniómetro.....	43
Figura 22 – Procedimento de limpeza seguido da imersão em ebulição das amostras.....	44
Figura 23 – Procedimento de medição da temperatura e do peso do provete imerso.....	45
Figura 24 – Limpeza do provete e medição do peso saturado. ....	45
Figura 25 – Procedimento de colocação dos provetes na estufa e medição do peso do provete seco. ....	45
Figura 26 – Métodos para medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. (adaptado: ISRM, 1978).....	47
Figura 27 - Procedimento e equipamento utilizado para medir a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas P e S. (1 – PUNDIT; 2 - Gel transmissor de ultra-sons; 3 - Cilindro calibrador; 4 - Transdutor de ondas P e S; 5 – Comutador P/S; 6 - Provete ensaiado).....	48
Figura 28 – Procedimento e equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	50
Figura 29 – Procedimento e equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão uniaxial com registo automático de extensões. (1 - Prensa hidráulica; 2 – Corpo de prova instrumentado e 3 – Registador computadorizado TML TDS-604) .....	51
Figura 30 – Determinação do módulo de Young, tangente a uma percentagem arbitrária de $\sigma_c$ . (adaptado: I.S.R.M., 1978).....	52
Figura 31 – Determinação do módulo de Young, média do troço rectilíneo. (adaptado: I.S.R.M., 1978). ....	52
Figura 32 – Determinação do módulo de Young, secante até uma percentagem arbitrária de $\sigma_c$ . (adaptado: I.S.R.M., 1978).....	53
Figura 33 – Procedimento de regularização da superfície do provete .....	55
Figura 34 – Procedimento de limpeza e desengorduramento da superfície do provete. ....	55
Figura 35 – Procedimento de marcação das linhas guia para colocação dos extensómetros.....	55
Figura 36 – Procedimento de preparação dos extensómetros. ....	56
Figura 37 – Procedimento de aplicação da cola e colagem dos extensómetros. ....	56
Figura 38 – Procedimento utilizado no processo de cura de um provete cilíndrico. ....	56

Figura 39 – Procedimento de soldadura dos cabos condutores aos extensómetros.....	57
Figura 40 – Provetes instrumentados com extensómetros, prontos para serem submetidos a ensaio .....	57
Figura 41 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (A). (A <sub>4</sub> e A <sub>8</sub> - tipo de rotura por corte; A <sub>1</sub> - tipo de rotura por lascamento).....	59
Figura 42 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (A1).....	60
Figura 43 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (B). (B <sub>1</sub> , B <sub>5</sub> e B <sub>7</sub> - tipo de rotura confinada).....	62
Figura 44 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (B9).....	62
Figura 45 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (C). (C <sub>3</sub> e C <sub>8</sub> – tipo de rotura por lascamento; C <sub>10</sub> e C <sub>7</sub> – tipo de rotura confinada; C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> e C <sub>11</sub> – tipo de rotura por corte).....	64
Figura 46 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (C4).....	65
Figura 47 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (D). (D <sub>3</sub> – tipo de rotura confinada; D <sub>9</sub> e D <sub>10</sub> – tipo de rotura por corte).....	66
Figura 48 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (D4).....	67
Figura 49 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (E). (E <sub>4</sub> , E <sub>10</sub> – tipo de rotura por corte; E <sub>7</sub> – tipo de rotura confinada.).....	69
Figura 50 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (E4).....	69
Figura 51 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (F). (F <sub>2</sub> – tipo de rotura confinada; F <sub>6</sub> e F <sub>7</sub> – tipo de rotura por lascamento; F <sub>3</sub> , F <sub>1</sub> e F <sub>9</sub> – tipo de rotura por corte).....	71
Figura 52 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (F4).....	72
Figura 53 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (G). (G <sub>4</sub> , G <sub>5</sub> e G <sub>9</sub> – tipo de rotura por corte; G <sub>2</sub> – tipo de rotura por lascamento; G <sub>8</sub> , G <sub>10</sub> e G <sub>3</sub> – tipo de rotura confinada).....	74
Figura 54 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (G6).....	74
Figura 55 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (H). (H <sub>1</sub> , H <sub>5</sub> e H <sub>2</sub> – Tipo de rotura por corte).....	76
Figura 56 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (H). (H <sub>8</sub> , H <sub>9</sub> e H <sub>10</sub> – Rotura confinada).....	77
Figura 57 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (H7).....	77
Figura 58 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova grupo (I), (I <sub>1</sub> , I <sub>5</sub> , I <sub>7</sub> e I <sub>4</sub> – Tipo de rotura por corte; I <sub>2</sub> , I <sub>8</sub> – Rotura confinada).....	79

Figura 59 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (I8). .....	80
Figura 60 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (J). (J <sub>4</sub> , J <sub>7</sub> e J <sub>8</sub> – tipo de rotura por corte; J <sub>3</sub> , J <sub>9</sub> e J <sub>10</sub> – rotura confinada). .....	82
Figura 61 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (J5).....	82
Figura 62 – Tipo de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R1), (1, 2 e 3 - rotura por lascamento). .	84
Figura 63 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (2R1).....	85
Figura 64 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R1.5), (1, 4 e 5 - rotura por corte).....	86
Figura 65 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R1.5).....	87
Figura 66 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R2), (1, 2 e 4 – rotura por corte; 2 – rotura por lascamento). .....	89
Figura 67 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R2).....	89
Figura 68 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R <sub>2.5</sub> ), (1, 3, 4 e 5 – rotura por corte). 91	
Figura 69 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R2.5).....	92
Figura 70 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R3), (1, 2, 3, 4 e 5 – rotura por corte). .	93
Figura 71 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (1R3).....	94

# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio de caracterização em laboratório e <i>in situ</i> de rocha e de maciços rochosos. (adaptado: Miranda, T. <i>et al</i> , 2006).....	7
Quadro 2 - Propriedades da matriz rochosa e métodos de determinação (adaptado: Vallejo, 2002).....	9
Quadro 3 – Resumo das leis de variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria dos provetes ensaiados. (adaptado: Sheorey, 1993).....	29
Quadro 4 – Tipos de amostragem e designação dos grupos de provetes.....	41
Quadro 5 - Factores que influenciam a propagação das ondas volumétricas num provete rochoso (adaptado: Ferreira, 2000).....	46

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade da água em função da temperatura. (Adaptado: LNEC E 216-1968). .....	11
Tabela 2 – Tipos litológicos mais comuns e as respectivas densidades. (adaptado: Ladeira, 1986). .....	11
Tabela 3 – Valores típicos do densidade aparente e porosidade aberta das rochas. (adaptado: Vallejo, 2002). .....	14
Tabela 4 - Porosidade aberta e a permeabilidade ao oxigénio de vários tipos de granito. ....	16
Tabela 5 - Valores típicos de permeabilidade da matriz rochosa. (adaptado: Vallejo, 2002).....	17
Tabela 6 – Velocidade de propagação das ondas longitudinais. (adaptado: Vallejo, 2002). ....	18
Tabela 7 - Valores de resistência da matriz rochosa sã. (adaptado: Vallejo, 2002).....	25
Tabela 8 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	58
Tabela 9 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	59
Tabela 10 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	59
Tabela 11 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	61
Tabela 12 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	61
Tabela 13 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	61
Tabela 14 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	63
Tabela 15 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	63

Tabela 16 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	64
Tabela 17 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	65
Tabela 18 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	66
Tabela 19 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	66
Tabela 20 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	68
Tabela 21 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	68
Tabela 22 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	68
Tabela 23 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	70
Tabela 24 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	70
Tabela 25 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	71
Tabela 26 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	73
Tabela 27 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	73
Tabela 28 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	73

Tabela 29 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	75
Tabela 30 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	76
Tabela 31 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	76
Tabela 32 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	78
Tabela 33 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	78
Tabela 34 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	79
Tabela 35 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	80
Tabela 36 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	81
Tabela 37 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	81
Tabela 38 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	83
Tabela 39 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	83
Tabela 40 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	84
Tabela 41 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	85

Tabela 42 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	86
Tabela 43 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	86
Tabela 44 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	88
Tabela 45 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	88
Tabela 46 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	88
Tabela 47 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	90
Tabela 48 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	90
Tabela 49 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	91
Tabela 50 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. ....	92
Tabela 51 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. ....	93
Tabela 52 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.....	93

# ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Densidade.....	10
Equação 2 – Peso específico. ....	10
Equação 3 – Densidade aparente ou massa específica de uma rocha. (LNEC E 216-1968).....	11
Equação 4 – Cálculo da absorção de água. (LNEC E 216-1968).....	12
Equação 5 – Porosidade.....	12
Equação 6 – Porosidade total. (LNEC E 216-1968).....	13
Equação 7 – Porosidade aberta. (LNEC E 216-1968). ....	13
Equação 8 – Porosidade fechada. (LNEC E 216-1968).....	13
Equação 9 – Permeabilidade de uma rocha. ....	14
Equação 10 – Fluxo de oxigénio.....	15
Equação 11 – Permeabilidade intrínseca ao oxigénio. (Grude e Lawrence, 1984) .....	16
Equação 12 – Resistência à compressão simples.....	20
Equação 13 - Equação de Bunting. ( <i>in</i> Ladeira, 1986). ....	34
Equação 14 - Equação de Beckman. ( <i>in</i> Ladeira, 1986).....	35
Equação 15 - Equação de ASTM. ( <i>in</i> Ladeira, 1986).....	35
Equação 16 - Equação Protodyakonov. ( <i>in</i> Ladeira, 1986).....	35
Equação 17 – Velocidade de propagação da onda ultassónica. (Liang e Wu, 2002). ....	49
Equação 18 – Velocidade de propagação das ondas P, (Taioli, 1999).....	49
Equação 19 - Velocidade de propagação das ondas S, (Taioli, 1999). ....	49
Equação 20 - Módulo de elasticidade transversal dinâmico, (Taioli, 1999). ....	49
Equação 21 - Coeficiente de Poisson dinâmico, (Taioli, 1999).....	49
Equação 22 - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, (Taioli, 1999).....	49
Equação 23 - Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.....	50
Equação 24 – Coeficiente de Poisson, (I.S.R.M., 1978).....	53
Equação 25 – Módulo de elasticidade transversal, (I.S.R.M., 1978).....	53

## SIMBOLOGIA

EC7 – Eurocódigo 7

IGeoE – Instituto Geográfico do Exercito

IGM – Instituto Geológico e Mineiro

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

UCS – Uniaxial compressive strength

$\gamma$  - Peso específico

$\eta$  - Porosidade

$\eta_a$  - Porosidade aberta

$\mu_a$  - A massa volúmica da água à temperatura ambiente;

$\mu_r$  - A massa volúmica do material refractário.

$\nu_d$  - Coeficiente de Poisson dinâmico

$\rho_a$  - Densidade aparente,

$\rho_w$  - Densidade da água à temperatura da realização do ensaio

$\sigma_c$  - Resistência a compressão simples

$\sigma_t$  - Resistência á tracção

$V_p$  - Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas P

$V_s$  - Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas S

A - Absorção de água

$A_c$  - Área de aplicação da força de compressão

$E_d$  - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico

D - Diâmetro do provete

$F_c$  - Força compressiva aplicada

$G_d$  - Módulo de distorção, ou módulo de elasticidade transversal

L - Altura do provete

$P_1$  - Peso da massa de rocha seca

$P_2$  - Peso da massa de rocha saturada

$P_3$  - Peso submerso de rocha saturada

t - Tempo

# 1. INTRODUÇÃO

Qualquer estudo sobre o comportamento mecânico de maciços rochosos não pode deixar de ser iniciado pela clara referência à importância que estas têm na diferenciação da Mecânica das Rochas como um ramo específico na Geotecnia.

A Mecânica das Rochas desenvolveu-se nos dois últimos decénios, e a própria designação desse novo ramo da mecânica apareceu somente por volta de 1955. Se durante muito tempo se pensou que a Mecânica das Rochas era aplicada exclusivamente na exploração mineira, a partir de 1950 começou a ganhar importância no âmbito da Engenharia Civil. Este facto deve-se à construção de grandes obras de engenharia, como por exemplo a barragem de Tignes, e o túnel de Mont Blanc que vieram a colocar novas questões, agravadas pela rotura das barragens de San Francisco (Califórnia, 1928), Malpasset (França, 1959), e Vajont (Itália, 1963), que devido a causas geológicas acarretaram graves consequências, inclusive a perda de centenas de vidas humanas. Actualmente a Mecânica das Rochas encontra-se em plena expansão e comporta as responsabilidades associadas a diversos problemas sociais e industriais inseridos no domínio do ordenamento do território, na energia, infra-estruturas e ambiente.

As caracterizações geotécnicas dos maciços rochosos começaram por ser classificações puramente geológicas, pensa-se que foi Terzaghi em 1946 o primeiro a estabelecer uma classificação para fins de aplicação geotécnica, nomeadamente para túneis (Mello Mendes, 1985); estas passaram então a incluir elementos de carácter estrutural (presença ou ausência de diaclases, superfícies de estratificação, outras superfícies de descontinuidade preenchidas ou não, etc.). Todavia a classificação de Terzaghi (1946), como outras classificações que se lhe seguiram apresentavam falhas como as de pretenderem determinar características de auto sustimento das escavações sem atenderem às dimensões das superfícies a serem sustentadas. Reconheceu-se ainda, como informação essencial para a sua adequada utilização prática, a consideração das características de resistência do material rochoso bem como das respectivas características de deformabilidade. Coates (1964), Bieniawski (1989), Wickham (1972), Barton (1962), a própria classificação BGD (*Basic Geotechnical Description of Rock Masses*), sugerida pela ISRM em 1980, incluem estes parâmetros nas suas classificações. Em todas elas existe no entanto, a imprecisão de assemelhar o material rochoso sujeito a ensaio, que determinará portanto as características mecânicas agora referidas, como representativo do maciço do qual faz parte. Ora é sabido que o mesmo

material rochoso diferentemente compartimentado exibirá certamente comportamentos mecânicos diferentes, para além de que aspectos como a influência da anisotropia, da heterogeneidade e elasticidade dos maciços na determinação das características resistentes obtidas em laboratório não são normalmente tidos em conta nos ensaios correntes.

As propriedades geomecânicas do maciço rochoso na determinação de parâmetros geomecânicos são de fundamental importância mas de complexidade elevada, devendo-se adoptar metodologias distintas dependendo do tipo de maciço e dos objectivos a analisar. A obtenção destes parâmetros nos vários tipos de maciços, quer rochosos quer terrosos, tem sofrido desenvolvimentos significativos nos últimos anos. Para estes desenvolvimentos têm contribuído diversos factores dos quais se destacam os seguintes:

- O aparecimento de novos instrumentos e equipamentos para os ensaios *in situ* e em laboratório que permitem uma maior precisão na avaliação do comportamento dos materiais e dos maciços;
- O aperfeiçoamento dos sistemas empíricos de classificação de maciços rochosos e de quantificação dos parâmetros geomecânicos;
- O melhoramento das técnicas de monitorização que permitem uma maior precisão na medição das grandezas observadas;
- A introdução de metodologias probabilísticas na caracterização de maciços;
- O desenvolvimento de ferramentas numéricas mais potentes que permitem a realização de análises com modelos mais complexos.

Nos maciços rochosos, a obtenção de parâmetros processa-se, para além do recurso a ensaios, através de metodologias empíricas que tentam relacionar os factores que influenciam o comportamento dos maciços. Os maciços heterogéneos são de natureza mais complexa, pelo que, para a sua caracterização, utilizam-se metodologias que combinam ensaios e classificações empíricas com ferramentas probabilísticas.

A modelação e a segurança constituem, assim, as bases do dimensionamento, o que pressupõe a elaboração de modelos, a análise das acções e a avaliação das propriedades dos materiais e do risco associado à construção da obra, de onde decorre a formulação de critérios de segurança (Cardoso, 2004). Tendo presente as incertezas inerentes a qualquer dimensionamento, este deve assegurar um nível de risco aceitável ou um nível de segurança especificado dependente da obra em questão e das consequências de um possível colapso (Caldeira, 2005).

Assim, a selecção dos valores característicos dos parâmetros geotécnicos é um dos aspectos cruciais das metodologias semi-probabilísticas de avaliação da segurança,

como é o caso das preconizadas no Eurocódigo 7 (EC7). O EC7 estabelece que a escolha dos valores característicos das propriedades dos solos e das rochas deve basear-se nos resultados de ensaios de laboratório e de campo. No entanto, segundo o mesmo EC7, o valor característico de uma propriedade deve ser entendido como uma estimativa cautelosa do valor médio que essa propriedade pode tomar. A avaliação dos valores característicos deve basear-se não só em resultados experimentais (que interessam quantidades relativamente pequenas de amostras), mas também na experiência e no risco inerente à obra. O EC7 permite também a utilização de métodos estatísticos na avaliação dos valores característicos das propriedades dos terrenos.

Da variabilidade natural dos maciços decorre que, no dimensionamento geotécnico, a avaliação das propriedades geotécnicas é o aspecto sobre o qual recai o maior grau de incerteza. Este facto decorre dos complexos processos geológicos envolvidos na formação dos maciços e das dificuldades da sua caracterização.

Segundo Mello Mendes e Ojima (1982), uma metodologia de classificação deve ser constituída por duas fases: a de **caracterização** (onde devem ser examinadas o maior número possível de características para que haja a garantia da escolha das mais pertinentes) e a da **escolha das características** que servirão como critérios de classificação (estas dependerão dos objectivos pretendidos). Ainda segundo os mesmos autores, os critérios escolhidos devem ter apenas um e um só significado relativamente ao parâmetro a estudar; acusar variações, isto é, permitir a distinção entre níveis de variação significativos que permitam o estabelecimento de graus; apresentar simplicidade operacional ou seja, depender o menos possível de ensaios.

Na sequência do que se afirmou anteriormente, entende-se por caracterização geomecânica de um maciço rochoso um conjunto de acções que vão desde o levantamento de diferentes características do maciço (petrográficas, geológicas, hidrogeológicas, reológicas, resistentes, etc.) até à escolha daquelas que face ao projecto proposto se tornem relevantes e permitam uma inequívoca divisão do maciço em diferentes zonas. A determinação destas características é efectuada com base na recolha de informações obtidas através das cartas geológicas, hidrográficas, topográficas, fotografia aérea, trabalhos efectuados na área.

Segundo Costa (2001), a construção de obras de engenharia de grandes dimensões exigem um conhecimento tão aprofundado quanto possível, sobre as características geológicas e mecânicas dos maciços rochosos e rochas constituintes em que vão ser implantadas para que não ocorram situações imprevistas. Uma adequada caracterização

geotécnica dos maciços rochosos habilita os responsáveis a definir os processos de construção mais económicos e mais seguros.

Desempenham papel extremamente importante a execução de alguns ensaios *in situ* que venham a corroborar resultados obtidos em ensaios laboratoriais. Estes podem posteriormente ajudar na calibração de algum modelo numérico que se julgue pertinente constituir para um melhor zonamento geotécnico.

Os ensaios *in situ* são muitas vezes de difícil execução e por isso dispendiosos, pelo que normalmente as caracterizações geomecânicas continuam a reflectir os resultados obtidos em determinações laboratoriais no que concerne a certas características como é o caso da resistência à compressão simples, assim, partindo do maciço rochoso (em grande escala), para os ensaios de laboratório que envolvem volumes reduzidos, pelo que é necessário efectuar um número considerável, quer para o material rochoso, quer para as superfícies de descontinuidade, de forma a contemplar a variabilidade nos parâmetros geomecânicos obtidos.

Um dos problemas tipicamente inerentes á caracterização geotécnica, e especialmente no âmbito da Mecânica das Rochas, é o efeito de escala, que se prende com a extrapolação para grandes massas dos resultados de ensaios realizados em amostras de pequena dimensão. Por seu lado, um dos ensaios mecânicos correntemente utilizados para determinação da resistência do material rochoso é o ensaio laboratorial de compressão uniaxial. Neste sentido uma boa caracterização mecânica de um maciço rochoso torna-se imprescindível aquando se pretende construir grandes obras de engenharia tais como: túneis, barragens, estradas, pontes, edifícios, etc. No entanto torna-se também extremamente relevante o estudo das características físicas e mecânicas dos materiais naturais, como por exemplo o granito, que tem diversas utilizações na construção de edifícios, pontes, castelos, entre outras tantas utilizações, desde elementos como acabamentos finais (passeios, pavimentos, revestimentos) e decorativos (peças de artes).

Os materiais naturais susceptíveis de diversos aproveitamentos e valorizações encontram-se repartidos, em Portugal, por todo o território e será justo destacar o seu contributo para a criação de riqueza e para o desenvolvimento do País, tanto mais que a realidade geológica compreende uma larga variedade de geomateriais que proporciona ao sector a necessária sustentabilidade.

No sector dos minerais e rochas industriais, o subsector dos geomateriais é o mais importante não apenas em valor acrescentado mas sobretudo pelo seu impacto ao nível das exportações. O mercado da pedra natural é cada vez mais exigente ao nível da qualidade e, como se trata de um subsector eminentemente de exportação/importação,

logo, uma adequada caracterização constitui uma mais-valia tornada quase imprescindível.

Com este conjunto de conceitos, ideias e opiniões pretende-se justificar a actualidade e a importância do tema desta dissertação.

## **1.1 OBJECTIVO DA DISSERTAÇÃO**

Pretende-se com o estudo agora proposto dar resposta aos seguintes objectivos:

- Contribuir para um melhor esclarecimento, no que concerne à variação da resistência à compressão uniaxial obtida em laboratório com a variação da geometria de amostras.
- Realização de ensaios laboratoriais que visam constatar a influência do efeito de escala na caracterização de maciços rochosos.
- Por fim, estabelecer relações entre os diferentes parâmetros geomecânicos.

## **1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Para além deste primeiro capítulo introdutório, que tem como finalidade justificar, descrever e estabelecer algumas definições prévias, este trabalho encontra-se estruturada em mais quatro capítulos.

O segundo capítulo foca a temática da análise e caracterização de maciços rochosos, desde a caracterização física à mecânica, é também apresentado uma série de autores, que estudaram a influência do efeito de escala na resistência à compressão simples de materiais rochosos.

No terceiro capítulo são desenvolvidos todos os aspectos referentes ao caso de estudo e da metodologia aplicada na realização dos diversos ensaios.

O quarto capítulo compreende a apresentação e análise dos resultados e o tratamento dos mesmos.

O último capítulo pretende destacar as conclusões mais relevantes dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

## 2. ANÁLISE E CARATERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A investigação geotécnica em maciços rochosos é feita com a realização de ensaios, em particular *in situ*, tendo em consideração a natureza descontínua, heterogénea e anisotrópica desses maciços, pelo que a avaliação dos parâmetros geomecânicos é, em larga medida, influenciada pelos volumes ensaiados.

Os ensaios *in situ*, visando a extrapolação das características de deformabilidade dos maciços são normalmente conduzidos aplicando uma carga de uma determinada forma a obter as correspondentes deformações do maciço. Quanto aos ensaios de caracterização da resistência dos maciços, ainda não completamente satisfatórios, são sobretudo materializados através de ensaios de corte ou de deslizamento ao longo de superfícies de baixa resistência (Rocha, 1971). Note-se que neste contexto os maciços podem ser considerados homogéneos a uma grande escala, pelo que pode não ser economicamente viável a realização de ensaios num volume de maciço significativo. No entanto, volumes de ensaio insuficientes causam problemas de efeito de escala, nomeadamente ao nível da resistência, e na dispersão de resultados a nível da deformabilidade (Cunha e Muralha, 1990).

Os ensaios em laboratório envolvem volumes reduzidos, pelo que é necessário efectuar um número considerável, quer para o material rochoso, quer para as superfícies de descontinuidade, de forma a contemplar a variabilidade nos parâmetros geomecânicos obtidos. Alguns destes ensaios são extremamente importantes na aplicação de sistemas empíricos, como é o caso, por exemplo, dos ensaios de resistência à compressão uniaxial da rocha, de carga pontual, triaxiais e de deslizamento de diaclases.

No caso em que os maciços rochosos exibem propriedades variáveis no tempo, nomeadamente devido a fenómenos de fluência e de expansibilidade, devem ser realizados ensaios específicos para este fim, quer em laboratório, quer no campo (Rocha, 1971; Wyllie, 1992).

### 2.1 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS

A caracterização mecânica dos maciços pode ser feita por intermédio de ensaios *in situ* em volumes representativos, englobando o material rochoso e as descontinuidades principais. A caracterização pode, também, ser executada por via indirecta realizando ensaios em laboratório sobre as superfícies de descontinuidade e o material rochoso, recomendando-se a sua calibração com alguns ensaios *in situ*. No Quadro 1, apresenta-

se um resumo dos principais ensaios de caracterização em laboratório e *in situ* de rocha e de maciços rochosos.

Ensaio de campo para a caracterização de maciços	
<b>Ensaio estático em sondagens:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Dilatómetros</li> <li>○ Pressiómetros</li> <li>○ Macacos para furos</li> </ul>	<b>Ensaio de placa:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Placa rígida</li> <li>○ Placa deformável</li> <li>○ Macacos ancorados</li> <li>○ Método Goffi</li> </ul>
<b>Ensaio de compressão:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Uniaxial</li> <li>○ Triaxial</li> </ul>	<b>Ensaio de pressão em túneis circulares:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Método de câmara de pressão</li> <li>○ Macaco radial</li> </ul>
<b>Ensaio em fenda aberta no maciço:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Macacos circulares</li> <li>○ Macacos planos de grande área (LFJ)</li> <li>○ Macacos planos de pequena área (SFJ)</li> </ul>	<b>Ensaio em fenda aberta no maciço:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ensaio dinâmico com propagação de ondas sísmicas</li> </ul>
Ensaio em laboratório	
<b>Ensaio estático:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Compressão uniaxial, diametral e pontual</li> <li>○ Corte directo e triaxial</li> <li>○ Flexão, torção e tracção uniaxial</li> <li>○ Deslizamento de diaclases</li> </ul>	<b>Ensaio dinâmico:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Método de ressonância</li> <li>○ Método das pulsações ultrassónicas</li> </ul>

**Quadro 1 – Ensaio de caracterização em laboratório e *in situ* de rocha e de maciços rochosos.**  
(adaptado: Miranda, T. *et al*, 2006).

Em relação aos ensaios laboratoriais para a avaliação da resistência do material rochoso, os principais são os de compressão uniaxial, triaxial, diametral (ensaio brasileiro) e pontual (*point load test*), os de tracção uniaxial, de corte e os de flexão. Referem-se, ainda, ensaios especiais de compressão diametral para a determinação das constantes elásticas dos corpos anisotrópicos. O ensaio de compressão uniaxial é muito utilizado para a caracterização da resistência e deformabilidade da rocha intacta.

Permite a obtenção não só da resistência à compressão uniaxial mas também do módulo de deformabilidade já que possibilita a obtenção de toda a curva tensão-deformação. No entanto, o ensaio mais rigoroso e fiável para a obtenção destes parâmetros é o ensaio triaxial, já que consegue reproduzir mais fielmente as condições de tensão *in situ* e as trajetórias de tensões mais adequadas. No entanto, envolve equipamento mais sofisticado e é mais demorado sendo por isso mais oneroso.

Outro ensaio muito utilizado é o ensaio de carga pontual em amostras de rocha cujo resultado é, normalmente, correlacionável com a resistência à compressão uniaxial

(Goodman, 1989; Miranda, 2003). A caracterização mecânica das descontinuidades é efectuada com base em ensaios de deslizamento, triaxiais, de corte e de torção (Goodman, 1989; Bandis, 1990).

## 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS ROCHOSOS

O estudo da mecânica dos sólidos assume, geralmente um comportamento homogéneo, contínuo, isotrópico, elástico e linear que os materiais rochosos não apresentam. A grande variabilidade das características e propriedades físicas e mecânicas reflecte-se tanto à escala da matriz rochosa, como do maciço rochoso fracturado.

A alteração e meteorização por processos físicos e químicos modificam a composição das rochas, aparecendo novos minerais com propriedades diferentes.

As propriedades e o comportamento mecânico dos maciços rochosos competentes influenciam o grau de fracturação e meteorização, com a presença de água, a orientação e tipo de descontinuidades, o tamanho dos blocos, etc. A importância das descontinuidades, como são os planos de estratificação, diaclases, falhas, etc., será também relativa em função da escala de trabalho: se o efeito das descontinuidades sobre o comportamento do maciço não é importante ou se é pequeno relativamente à escala da obra ou estrutura considerada, o meio pode ser considerado contínuo, mas se as dimensões dos planos ou zonas de debilidade afectam o comportamento do maciço no âmbito considerado, o seu estudo deve ser feito em separado.

As propriedades físicas das rochas são o resultado da sua composição mineralógica, *fábrica* e história geológica, deformadora e ambiental, incluindo os processos de alteração e meteorização. A grande variabilidade destas propriedades reflecte-se em comportamentos mecânicos diferentes, frente a forças que se aplicam sobre as rochas, comportamentos que ficam definidos pela resistência do material e pelo seu modelo de deformação. Assim, enquanto um granito são, comporta-se de forma elástica e frágil perante cargas elevadas, uma marga ou uma lutita podem apresentar um comportamento dúctil perante cargas moderadas ou baixas.

Existe uma série de parâmetros que se utilizam na identificação e descrição quantitativa das propriedades básicas das rochas e que permitem, mesmo assim, estabelecer uma primeira classificação com fins geotécnicos. Estas propriedades serão as que primeiramente, determinarão juntamente com a composição mineralógica e a *fábrica*, as

propriedades e o comportamento mecânico da matriz rochosa. No Quadro 2, são apresentados alguns métodos para determinar algumas propriedades da matriz rochosa.

	<b>Propriedades</b>	<b>Métodos de Determinação</b>
<b>Propriedades de Identificação e Classificação</b>	Composição mineralógica; Fábrica e textura Tamanho do grão Cor	Descrição visual; Microscópica óptica e electrónica Difracção de raios X
	Porosidade ( $\eta$ )	Técnicas de laboratório
	Peso específico ( $\gamma$ )	
	Humidade	
	Permeabilidade (coeficiente de permeabilidade, $K$ )	Ensaio de permeabilidade
	Durabilidade Alterabilidade (índice de durabilidade)	Ensaio de alterabilidade
<b>Propriedades Mecânicas</b>	Resistência a compressão simples ( $\sigma_c$ )	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de carga pontual Martelo de Schmith
	Resistência á tracção ( $\sigma_t$ )	Ensaio de tracção directa Ensaio de tracção indirecta
	Velocidade das ondas sísmicas ( $V_p, V_s$ )	Medição das ondas sísmicas em laboratório
	Resistência (parâmetros $c$ e $\theta$ )	Ensaio de compressão triaxial
	Deformabilidade (módulos de deformação elástica estáticos e dinâmicos, $E$ e $\nu$ )	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de velocidade sísmica

**Quadro 2 - Propriedades da matriz rochosa e métodos de determinação** (adaptado: Vallejo, 2002)

A descrição geológica da rocha inclui o seu nome, mineralogia, textura, tipo de cimentação e grau de alteração. A descrição petrográfica realiza-se mediante a observação macroscópica das amostras e das análises microscópicas, necessárias para conhecer a composição, textura, fábrica, grau de alteração, microfracturação, porosidade, etc. O estudo acerca da porosidade faz-se após a análise de lâminas delgadas, microscopia óptica e electrónica e emprego de técnicas de difracção de raios - X.

O estudo petrofísico da matriz rochosa permite interpretar a suas propriedades físicas em função dos seus componentes e características petrográficas (poros e fissuras, uniões intergranulares, anisotropias, minerais, composição química, etc.).

A orientação dos minerais, a dureza ou a estrutura cristalina podem determinar a reacção mecânica das rochas perante forças externas. Muitas destas propriedades intrínsecas das rochas dependem da estrutura das partículas minerais e da forma como estas estão organizadas, (Vallejo, 2002).

## 2.2.1 Propriedades físicas

As **propriedades físicas** das rochas são determinadas em laboratório, sendo que, as mais importantes a nível de influência no comportamento mecânico são a porosidade, o peso específico, a absorção de água, a permeabilidade, a alterabilidade, e a velocidade de propagação das ondas sísmicas.

Estas propriedades além de caracterizarem as rochas, estão também relacionadas com as suas características resistentes e de deformabilidade.

De seguida serão descritas algumas propriedades físicas, assim como serão apresentados alguns valores característicos para alguns deles

### 2.2.1.1 Peso específico ( $\gamma$ )

Define-se como o peso por unidade de volume e depende dos componentes da rocha. As suas unidades são a força por volume. Geralmente, considera-se o mesmo valor para a densidade, que se pode determinar pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

**Equação 1 – Densidade.**

Ao trabalhar com o peso específico deve ficar claro que se está a trabalhar com unidades de força e não de massa. Assim:

$$\gamma = \rho \cdot g = 1g_{\text{massa}} \times 980 \text{ cm/s}^2 = 980 \text{ dinas/cm}^3 = 1 g_{\text{força}}/\text{cm}^3$$

ou

$$\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 9800 \text{ N/m}^3 = 1000 \text{ kgf/m}^3$$

**Equação 2 – Peso específico.**

### 2.2.1.2 Densidade aparente, ( $\rho_a$ )

No geral, a densidade é a relação entre a massa volúmica da matéria em causa e a massa volúmica da matéria de referência, como a água.

Nos materiais porosos, como é o caso das rochas, podem determinar-se dois tipos de densidade: a densidade real e a densidade aparente. Enquanto a densidade real respeita a definição clássica, a densidade aparente representa a densidade da rocha seca e define-se como a massa de material seco por unidade de volume total, ou seja, o

somatório do volume da parte sólida com o volume dos espaços vazios. A densidade aparente ou a massa específica aparente de uma rocha é obtida pela seguinte equação:

$$\rho_a = \left[ \frac{P_1}{(P_2 - P_3)} \right] \times \rho_w$$

**Equação 3 – Densidade aparente ou massa específica de uma rocha.** (LNEC E 216-1968).

em que:

$P_1$  – Peso da massa de rocha seca;

$P_2$  – Peso da massa de rocha saturada;

$P_3$  – Peso submerso de rocha saturada;

$\rho_w$  – Densidade da água à temperatura da realização do ensaio (Tabela 1) .

Temperatura °C	Densidade da água $\rho_w$
4 a 12	1,000
13 a 18	0,999
19 a 23	0,998
24 a 27	0,997
28 a 30	0,996

**Tabela 1 – Densidade da água em função da temperatura.** (Adaptado: LNEC E 216-1968).

Para se ter uma ideia da densidade das rochas, apresenta-se a Tabela 2.

Rocha	Varição de Densidade ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Média [kN/m <sup>3</sup> ]
Granito	25,16 – 28,09	26,67
Sienito	26,68 – 27,85	27,16
Diorito	27,21 – 29,60	28,39
Gabro	28,50 – 31,20	29,76
Diabáse	28,04 – 31,10	29,65
Basalto (vidro)	27,04 – 28,51	27,72
Arenito	21,70 – 27,00	---
Calcário	23,70 – 27,50	---
Dolomito	27,50 – 28,00	---
Mármore	27,50	---
Argilo-xistos	20,60 – 26,60	---
Areia	19,20 – 19,30	---
Gnaisse	25,90 – 30,60	27,03
Xisto	27,00 – 30,30	27,90
Ardósia	27,20 – 28,40	28,10
Anfibolito	27,90 – 31,40	29,90

**Tabela 2 – Tipos litológicos mais comuns e as respectivas densidades.** (adaptado: Ladeira, 1986).

### 2.2.1.3 Absorção de água (A)

A absorção de água pelas rochas realiza-se por capilaridade ou por imersão. A absorção de água por imersão total corresponde à quantidade de água absorvida pelo material, quando totalmente submerso, à pressão e temperatura ambiente.

O estudo desta propriedade fornece uma boa estimativa do grau de saturação máxima da rocha, seja sob acção da chuva, do escoamento superficial ou da ascensão capilar.

Em laboratório, segundo a especificação E216-1968 do LNEC, a absorção de água pode ser quantificada de forma simples com recurso à seguinte equação:

$$A = \left[ \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \right] \times 100\%$$

**Equação 4 – Cálculo da absorção de água.** (LNEC E 216-1968).

Onde,  $P_1$  e  $P_2$  são os pesos da massa da amostra seca e saturada, respectivamente, tal como foi feito para a densidade aparente.

### 2.2.1.4 Porosidade ( $\eta$ )

Estas propriedades físicas das rochas estão ligadas à existência de redes de fissuras e poros, mais ou menos interligadas. Trata-se da propriedade que mais afecta as características resistentes e mecânicas, e é inversamente proporcional à resistência e à densidade e é directamente proporcional à deformabilidade, pelo que, as zonas de vazios podem dar lugar a zonas de debilidade. A porosidade, geralmente decresce com profundidade e com a idade das rochas. O valor da ( $\eta$ ) pode variar entre 0% e 90%, com valores normais entre 15% e 30%.

A porosidade é a relação entre o volume de vazios,  $V_v$ , e o volume total,  $V$  (partículas sólidas + vazios):

$$\eta(\%) = \frac{V_v}{V}$$

**Equação 5 – Porosidade.**

Segundo a especificação E216-1968 do LNEC, podem distinguir-se dois tipos de porosidade: a porosidade aberta, que se refere aos poros ligados intercomunicantes e a porosidade fechada que corresponde aos poros isolados, que não comunicam entre si, sendo que a soma das duas resulta na porosidade total. Apenas os poros onde circulam

os fluidos têm importância no estudo da alterabilidade das rochas, logo é a porosidade aberta que tem um grande interesse nas rochas pois condiciona a sua capacidade para o armazenamento e circulação de fluidos.

A porosidade total define-se como sendo a diferença entre o volume do provete e o volume de igual massa de refractário pulverizado, expressa em percentagem do volume do provete, sendo dada

$$\eta = \left[ 1 - \frac{P_1}{P_2 - P_3} \times \frac{\mu_a}{\mu_r} \right] \times 100\%$$

**Equação 6 – Porosidade total.** (LNEC E 216-1968).

em que:

$P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  são os pesos da massa da amostra seca, saturada e imersa, respectivamente, tal como foi feito para a densidade aparente;

$\mu_a$  – A massa volúmica da água à temperatura ambiente;

$\mu_r$  – A massa volúmica do material refractário.

A porosidade aberta, por seu lado, corresponde ao volume de água absorvida pelo provete, em água em ebulição, expresso em percentagem do volume deste, sendo dado pela fórmula:

$$\eta_a = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100\%$$

**Equação 7 – Porosidade aberta.** (LNEC E 216-1968).

E a porosidade fechada será então:

$$\eta_f = \eta_t - \eta_a$$

**Equação 8 – Porosidade fechada.** (LNEC E 216-1968).

Na Tabela 3, podem ser observados alguns valores de porosidade para alguns tipo de rochas e o respectivo peso específico, sendo de referir que se considera que as porosidades da ordem dos 5% baixa e da ordem dos 15% como alta, (Vallejo, 2002).

Rocha	Densidade aparente ( $\rho_a$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	Porosidade aberta ( $\eta_a$ ) [%]
Andesito	22 - 23,5	10 - 15
Anfibola	29 - 30	---
Arenito	23 - 26	5 - 25 (16,0)
Basalto	27 - 29	0,1 - 2
Cal	23 - 26	5 - 20 (11,0)
Carvão	10 - 20	10
Quartzito	26 - 27	0,1 - 0,5
Carbonato de cálcio	17 - 23	30
Diorite	29	0,1
Dolomite	27 - 28,5	---
Xisto	25 - 26	0,5 - 10
Gabro	25 - 28	3
Gneisse	30 - 31	0,1 - 0,2
Granito	27 - 30	0,5 - 1,5
Grauvaques	26 - 27	0,5 - 1,5 (0,9)
Mármore	28	3
“Lutita”	26 - 28	0,3 - 2 (0,6)
ardósia	22 - 26	2 - 15
Riolito	25 - 27	0,1 - 1
Sal	24 - 26	4 - 6
“Toba”	21 - 22	5
Gesso	19 - 23	14 - 40

Tabela 3 – Valores típicos do densidade aparente e porosidade aberta das rochas. (adaptado: Vallejo, 2002).

### 2.2.1.5 Permeabilidade (k)

A permeabilidade é a capacidade que as rochas têm de se deixar atravessar por um fluído. Na sua grande maioria, as rochas apresentam uma permeabilidade muito baixa. A infiltração na rocha dá-se pela matriz rochosa, e depende da quantidade de poros e fissuras que a rocha apresenta, o grau de meteorização, a anisotropia e os estados de tensão a que está sujeito o material.

A permeabilidade de uma rocha mede-se pelo seu coeficiente de permeabilidade, o qual se pode expressar em m/s, cm/s ou m/dia:

$$K = k \times \left( \frac{\gamma_u}{\mu} \right)$$

Equação 9 – Permeabilidade de uma rocha.

em que:

$k$  - É a permeabilidade intrínseca, dependendo unicamente das características do meio físico;

$\gamma_u$  - É o peso específico da água;

$\mu$  - É a viscosidade da água.

A permeabilidade pode não ser só a capacidade que as rochas têm de se deixar atravessar por um fluído, pode ser também a capacidade de se deixarem atravessar por um gás, nomeadamente o oxigénio. Em seguida, ir-se-á abordar sucintamente este tema. Para a determinação da permeabilidade ao oxigénio, deve-se obedecer ao disposto na especificação do LNEC E 392-1993.

O aparelho utilizado para a obtenção deste parâmetro é o permeâmetro, o qual permite submeter cerca de 4 amostras, as quais devem ter cerca de 4 cm de altura e 5 de diâmetro, a uma pressão constante durante um determinado intervalo de tempo. Neste ensaio à que garantir que o fluxo de oxigénio que atravessa o provete é estável e uniaxial.

Após algum tempo, o fluxo de ar que atravessa o provete pode ser considerado laminar, podendo-se então aplicar a lei de Darcy. Esta lei permite-nos saber qual a variação da pressão no interior do provete em estudo, e permite-nos bons resultados, desde que a amostra possua uma espessura inferior a 10 cm.

O fluxo do oxigénio que travessa o provete é dado pela seguinte equação:

$$V = \frac{K_a \times A \times \Delta P}{\eta \times L}$$

**Equação 10 – Fluxo de oxigénio**

em que:

$K_a$  - É a permeabilidade intrínseca ao oxigénio, em  $m^2$ ;

$A$  - Área de secção do provete atravessada pelo oxigénio, em  $m^2$ ;

$\Delta P$  - Diferença de pressão através da espessura do corpo de prova, em  $N.m^{-2}$ ;

$\eta$  - Viscosidade do fluído, em  $Ns.m^{-2}$ ;

$L$  - Espessura do corpo de prova, em m.

A permeabilidade intrínseca ao oxigénio, depende única e exclusivamente das propriedades do meio poroso, ao contrário da coeficiente de permeabilidade determinado pela lei de Darcy, que depende da viscosidade e permeabilidade tanto do fluído como do meio poroso que atravessa. Desta forma, quando se utiliza um fluído compressível, como

é o caso do oxigénio, o gradiente de pressão não vai ser constante em todo o corpo de prova, assim Grude e Lawrence (1984), propõem que a permeabilidade intrínseca ao oxigénio deve ser dada pela seguinte equação:

$$K_a = \frac{4,04 \times R \times L \times 10^{-16}}{A \times (p^2 - 1)}$$

**Equação 11 – Permeabilidade intrínseca ao oxigénio.** (Grude e Lawrence, 1984)

em que:

*R* - Fluxo de oxigénio à saída, em cm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>;

*L* - Espessura do corpo de prova, em m;

*A* - Área de secção do provete atravessada pelo oxigénio, em m<sup>2</sup>;

*p* - Pressão de oxigénio à entrada, em bars, sendo a pressão de saída de 1 bar.

Na Tabela 4, pode observar-se a porosidade aberta e a permeabilidade ao oxigénio para diferentes graus de alteração de granito (Cavaleiro, 2001).

Grau de alteração do granito	Amostras	Porosidade aberta ( $\eta_a$ ) [%]	Permeabilidade intrínseca ( $K_a$ ) [m <sup>2</sup> ]
<b>Granito são</b> – Feldspatos com cor branca, leitosa e brilho nascarado. A mica apresenta-se bem negra e brilhante. Necessita de uma forte pancada com a marreta para se atingir a ruptura. A dureza Schmidt apresenta valores superiores a 40	W1a	0.63	2.40x10 <sup>-17</sup>
	W1b	0.58	1.61x10 <sup>-17</sup>
	W1c	0.45	1.84x10 <sup>-17</sup>
	W1d	0.64	2.30x10 <sup>-17</sup>
	W1e	0.50	1.66x10 <sup>-17</sup>
	W1f	0.68	1.25x10 <sup>-17</sup>
	W1g	0.63	1.95x10 <sup>-17</sup>
<b>Granito pouco alterado</b> – Os feldspatos são brancos com ligeira impregnação de óxidos de ferro. A ruptura da rocha é difícil de atingir com um martelo. O uso de uma marreta parte a rocha facilmente. Os valores do martelo de Schmidt registados são compreendidos entre 30 e 39.	W2a	1.64	2.27x10 <sup>-16</sup>
	W2b	1.58	1.90x10 <sup>-16</sup>
	W2c	1.70	2.71x10 <sup>-16</sup>
	W2d	1.78	3.11x10 <sup>-16</sup>
	W2e	1.59	2.15x10 <sup>-16</sup>
	W2f	1.46	5.16x10 <sup>-16</sup>
	W2g	1.43	1.87x10 <sup>-16</sup>
<b>Granito muito alterado</b> – Os feldspatos pouco pulvulentos são de cor creme, apresentando manchas castanho claro, provocadas pela impregnação de óxidos e hidróxidos de ferro, provenientes da lixiviação da biotite. Atinge-se a ruptura da rocha com uma pancada seca de um martelo. A dureza Schmidt apresenta valores compreendidos entre 20 e 29.	W3a	3.45	3.64x10 <sup>-16</sup>
	W3b	3.75	3.39x10 <sup>-16</sup>
	W3c	3.80	6.30x10 <sup>-16</sup>
	W3d	3.85	7.45x10 <sup>-16</sup>
	W3e	3.19	9.42x10 <sup>-16</sup>
	W3f	4.11	7.62x10 <sup>-16</sup>

**Tabela 4 - Porosidade aberta e a permeabilidade ao oxigénio de vários tipos de granito.**

Na Tabela 5, apresentam-se os valores do coeficiente de permeabilidade para diversas rochas, mas devido à dificuldade de estimação e de atribuição de valores específicos, estes são dados em intervalos de valores.

Rocha	K [m/s]
Arenito	$10^{-5}$ - $10^{-10}$
Cal	$10^{-6}$ - $10^{-12}$
Xisto	$10^{-7}$ - $10^{-8}$
Ardósia	$10^{-11}$ - $10^{-13}$
Granito	$10^{-9}$ - $10^{-12}$
“Lutita”	$10^{-9}$ - $10^{-13}$
Rochas metamórficas	$10^{-9}$ - $10^{-12}$
Rochas vulcânicas	$10^{-7}$ - $10^{-12}$
Sal	$< 10^{-11}$ - $10^{-13}$

Tabela 5 - Valores típicos de permeabilidade da matriz rochosa. (adaptado: Vallejo, 2002).

#### 2.2.1.6 Durabilidade

A durabilidade vai ser a resistência que a rocha apresenta frente aos processos de alteração e desintegração, esta propriedade está intimamente relacionada com a alterabilidade, definindo-se esta, como a vulnerabilidade dos componentes da rocha têm à degradação.

Diversos processos, como a hidratação, a dissolução ou a oxidação modificam as propriedades das rochas. Em determinados tipos de rochas, como as vulcânicas, lutíticas ou ardósias com componentes importantes de materiais argilosos, a exposição ao ar ou a presença de água, vai degradar de forma muito importante as propriedades resistentes, de tal forma que podem ser mal avaliadas para usos de engenharia, tais como escavações superficiais, túneis, terraplanagens, etc., uma vez que o seu comportamento não é considerado, por estarem em contacto com a atmosfera.

A durabilidade de uma rocha aumenta com a densidade e reduz-se com a quantidade de água que esta apresenta, esta propriedade avalia-se através do ensaio secagem-humidade-desgaste “*slake durability test*” (SDT).

### 2.2.1.7 Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas

A velocidade e propagação das ondas ultrassônicas, ao atravessar a rocha depende da densidade e das propriedades elásticas do material, e para além disso dá-nos informações sobre algumas características físicas da rocha, tal como a sua porosidade.

A velocidade de propagação das ondas longitudinais ou de compressão,  $V_P$ , utiliza-se como índice de classificação, e o seu valor indica-nos a qualidade da rocha, correlacionando-se linearmente com a resistência à compressão simples  $\sigma_c$ .

Para rochas a velocidade varia entre 1000 e 6000 m/s. Para rochas meteorizadas obtêm-se valores abaixo dos 900 m/s, já um granito pode apresentar valores na ordem dos 6000 m/s. Se este se apresentar alterado a velocidade reduz-se proporcionalmente ao grau de meteorização, cerca de metade a um terço deste valor, e se apresentar muito decomposto a sua velocidade pode reduzir-se até aos 700-800 m/s.

Na Tabela 6, podemos observar a velocidade de propagação das ondas longitudinais para alguns tipos de rocha.

<b>Rocha sã</b>	<b>Velocidade de propagação das ondas <math>V_P</math> [m/s]</b>
Arenito	1400 - 4200
Basalto	4500 - 6500
Cal	2500 - 6000
Conglomerado	2500 - 5000
Quartzito	5000 - 6500
Diorite	5500 - 7000
“Dolerita”	4500 - 6500
Dolomite	5000 - 6000
Gabro	4500 - 6500
Gneisse	3100 - 5500
Granito são	4500 - 6000
“Lutita”	1400 - 3000
Marga	1800 - 3200
Mármore	3500 - 6000
Ardósia	3500 - 5000
Sal	4500 - 6000
Gesso	3000 - 4000

**Tabela 6 – Velocidade de propagação das ondas longitudinais.** (adaptado: Vallejo, 2002).

Os estudos realizados neste âmbito, permitiram verificar que a velocidade de propagação das ondas sísmicas, longitudinais  $V_L$  ou  $V_P$  (ondas de compressão), e das ondas transversais  $V_S$ , variam significativamente com a presença de descontinuidades. Deste

modo, aproveitando este efeito, e recorrendo a ensaios não destrutivos (ensaios geofísicos) como o ensaio sísmico, é possível determinar as características elásticas.

A realização de ensaios, não destrutivos, para determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas em provetes, que vão ser submetidos posteriormente a ensaios de compressão uniaxial, é muito frequente existindo vários métodos que permitam a determinação dos valores quer da velocidade de propagação das ondas longitudinais ( $V_P$ ), quer das ondas transversais ( $V_S$ ).

### **2.2.2 Propriedades mecânicas**

Segundo Vallejo (2002), as propriedades mecânicas das rochas podem dividir-se em duas categorias:

- As de resistências a solicitações mecânicas: tracção, compressão uniaxial ou triaxial, definindo patamares ou critérios de rotura;
- As de deformabilidade sob o efeito de solicitação mecânicas: módulos instantâneos ou diferidos.

Existem vários ensaios laboratoriais que nos permitem obter a resistência e a deformabilidade, entre os quais: resistência à compressão simples, resistência à tracção, resistência à flexão e compressão triaxial. Existem também alguns ensaios expeditos e rápidos que nos permitem estimar a resistência à compressão das rochas e o módulo de elasticidade de forma aproximada, podemos dar com exemplo: Esclerómetro ou martelo de Schmidt; ensaio de carga pontual e ensaio de Windsor. Estes métodos de ensaios expeditos são extremamente úteis em campo, como por exemplo no estudo de frentes de pedreiras onde podemos estimar rapidamente a resistência à compressão das rochas que estamos a extrair. Com os valores obtidos por qualquer um destes métodos pode-se classificar a rocha quanto à sua resistência e deformabilidade, sempre como uma primeira aproximação.

Após esta resumida apresentação dos vários ensaios que nos permitem obter as propriedades mecânicas das rochas, passamos de seguida à apresentação do ensaio de compressão uniaxial, apenas este será alvo de uma apresentação detalhada, visto ser este o ensaio laboratorial, que este trabalho pretende incidir para atingir os objectivos propostos.

### 2.2.2.1 Ensaio de compressão uniaxial (UCS)

O ensaio de compressão uniaxial é dos ensaios mecânicos o mais importante, pois este é de uso corrente para a determinação das características de resistência máxima à rotura por compressão de materiais naturais e artificiais, tais como rochas e o betão.

Este ensaio permite determinar em laboratório a resistência à compressão uniaxial da rocha ( $\sigma_c$ ), e as constantes elásticas: o módulo de Young ou de elasticidade (E), e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), ou seja é um ensaio para classificação da rocha através da resistência e deformabilidade. A relação entre os esforços aplicados nos ensaios é:  $\sigma_1 \neq 0$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . As geometrias dos corpos de prova mais vulgarizadas submetidas a este ensaio, são as prismáticas e cilíndricas, pois estas são as mais rapidamente modeladas.

Após conveniente preparação, a amostra de rocha é carregada entre os pratos de uma máquina de ensaio (prensa) e submetida a esforços que poderão levar o corpo de prova à rotura. As cargas são aplicadas progressivamente em ciclos de carga e descarga e as modificações de deformação do corpo de prova são medidas com extensómetros eléctricos ou mecânicos. O ensaio dará então uma ideia de deformabilidade e da resistência da respectiva amostra.

Através da medição das deformações longitudinais obtém-se a curva tensão-deformação da rocha ensaiada, apresentada na Figura 1, a partir do qual se determina o módulo de elasticidade (E), e por sua vez, o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que é estimado através da análise da variação das extensões transversais de longitudinais, para os diferentes valores de tensão aplicados ao provete, aplicado as equações existentes na Figura 1. É ainda possível determinar a resistência à compressão simples ou resistência uniaxial, que é o máximo de esforço suportado pela rocha, estando submetida a uma compressão uniaxial, e pode-se determinar pela seguinte equação:

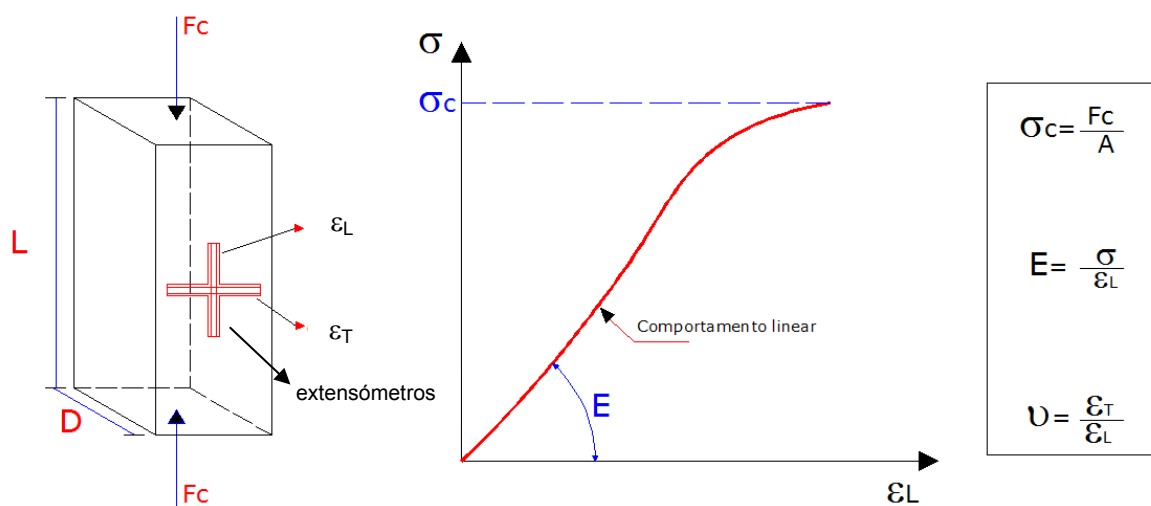
$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

**Equação 12 – Resistência à compressão simples**

em que:

$F_c$  - É a força compressiva aplicada;

$A$  - É a área de aplicação.



**Figura 1 – Curva típica de tensão-deformação.** (L – altura do provete; D – comprimento da aresta da base ou diâmetro do provete;  $F_c$  – força de compressão aplicada ao provete;  $\varepsilon_L$  – extensões longitudinais;  $\varepsilon_T$  – extensões transversais;  $\sigma_c$  – resistência à compressão uniaxial; A – área de aplicação da força; E – módulo de elasticidade;  $\nu$  – Coeficiente de Poisson)

Na Figura 1, apresenta um exemplo da curva típica de tensão-deformação obtida neste tipo de ensaio e de material com comportamento frágil. A curva apresenta um tramo ascendente onde a relação entre a carga aplicada e a deformação produzida é linear, e pode-se assumir que se cumpre a lei de Hooke, ou seja,  $E = \text{constante}$ , e neste tramo onde o comportamento é linear as deformações são recuperáveis.

Normalmente assume-se que a fractura da rocha por compressão ocorre quando se alcança a resistência de pico ( $\sigma_c$ ), experimentalmente está comprovado que o processo de rotura e o aparecimento de micro fissuras começa antes de se atingir a resistência de pico, entre 50% e 95% da resistência à compressão simples,  $\sigma_c$ , (Brown, 1981).

É de salientar que a interpretação do ensaio nem sempre é fácil, pois depende de factores internos, tais como:

- Mineralogia;
- Factor “escala” (relação dimensional do corpo de prova e tamanho dos grãos);
- Porosidade;
- “Fabric”, ou arranjo estrutural dos minerais constituintes;
- Fracturação ou outras discontinuidades;
- Grau de alteração.

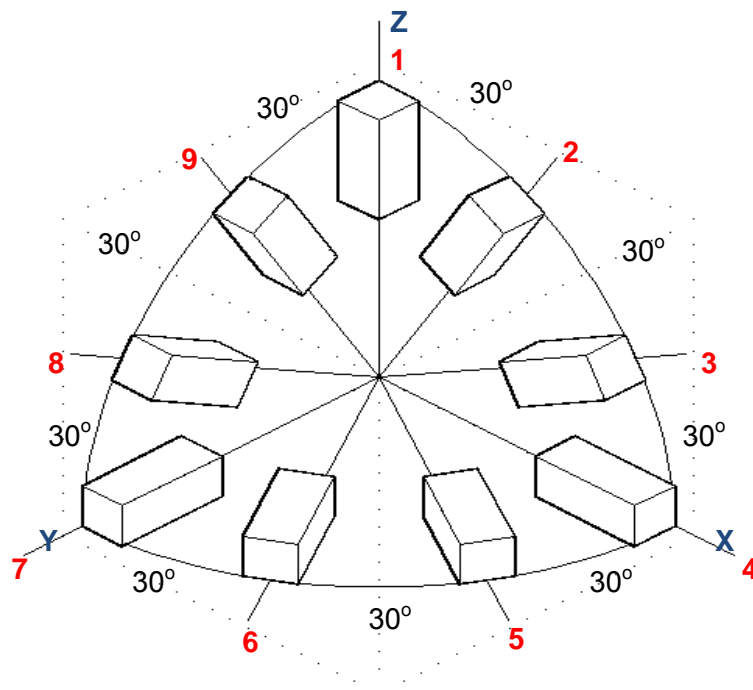
A mineralogia, tamanho do grão e porosidade são as propriedades intrínsecas da rocha que controlam a sua resistência. Quanto maior for a percentagem de quartzo existente num corpo de prova, mais resistente será. A resistência da rocha é mais elevada para aquelas que apresentam granulometria mais fina, enquanto que com o aumento da porosidade a resistência será menor (Vallejo, 2002).

Dos factores externos que afectam o resultado do ensaio podem citar-se:

- Atrito entre os pratos da prensa e as extremidades do corpo de prova;
- Geometria do corpo de prova (forma, relação altura - diâmetro e tamanho);
- Velocidade de carregamento ou de deformação;
- Ambiente (temperatura, humidade relativa, grau de saturação, etc.);

Para que os resultados obtidos possam ser fiáveis, os corpos de prova devem ser ensaiados em condições tão próximas quanto possível àquelas que ocorrem no local do maciço onde o projecto será realizado.

Um dos aspectos muito importantes diz respeito aos blocos de rochas destinados à obtenção de corpos de ensaios, estes devem ser devidamente orientados no campo, para que os corpos de prova possam ser obtidos com a orientação desejada, como é mostrado na Figura 2.



**Figura 2 -Esquema de extracção de corpos de prova, orientados a partir de um bloco.** (adaptado: Ladeira, 1986).

Para uma perfeita execução do ensaio deve-se ter em conta as influências dos principais factores externos e internos bem como alguns cuidados que devem ser tomados. As recomendações feitas pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (I.S.R.M., 1978) e outros autores são:

- i. As amostras para o ensaio deverão ser extraídas de um bloco ou do próprio maciço por serragem com disco diamantado (caso dos corpos de prova prismáticos) ou através de sonda rotativa (caso de corpos cilíndricos), para que os corpos de prova sofram o mínimo de perturbação possível, isto é, não ocorra a micro-fracturação interna;
- ii. As arestas laterais ou geratrizes devem ser planas e paralelas entre si e os seus planos devem ser perpendiculares às bases, que por sua vez devem ser planas e paralelas entre si;
- iii. A rugosidade das bases não deve ultrapassar 0.02 mm e a perpendicularidade destas com as arestas laterais ou geratrizes não deve ser maior que 0.001 radianos (cerca de 3.5 minutos) ou 0.05 mm em 50 mm;
- iv. O diâmetro dos corpos de prova deve ser 10 vezes maior que o maior grão da amostra de rocha;
- v. Os corpos de prova não devem ser capeados, mas polidos, porque o capeamento pode ser mais deformável que a rocha, e pode introduzir tensões de tracção nos corpos de prova, podendo falsear desta forma, os ensaios Jenkins (1958), Brady (1943, entre outros). Caso seja preciso capear, deve-se utilizar um material com deformabilidade próxima à da rocha;
- vi. Os pratos de prensa devem ter a mesma dimensão das bases dos corpos de prova, caso contrário, devem ser feitas chapas de aço com espessura mínima de 2 cm;
- vii. Devem verificar-se as medidas das bases, fazendo essa medida perpendicularmente às arestas laterais, tanto nos topos como nos meios e tomada a média das medidas. A altura também deve ser registada;

- viii. Os corpos de prova só podem ser armazenados até 30 dias e devem ser preservados da humidade e temperatura. Para que se possam fazer analogias, no momento do ensaio, a humidade da amostra deve ser semelhante àquela onde a obra será implantada;
- ix. Devem ser ensaiados no mínimo 5 corpos de prova, para se ter um valor representativo. Sendo esse número dependente da heterogeneidade da rocha e do conhecimento que se tem dela;
- x. A relação altura - diâmetro influencia em muito os resultados do ensaio pelo que deve estar compreendida entre 2.5 a 3;
- xi. Quanto à velocidade de carregamento, a IRSM sugere que seja de 0.5 a 1 MPa por segundo.
- xii. O grau de saturação da amostra depende da humidade relativa do ar. A humidade tem influência marcante na resistência à compressão simples que aumenta com o aumento da porosidade.

Segundo Ladeira (1986), em relação aos **tipos de fracturas**, os corpos de prova submetidos a ensaios de compressão simples, observam-se três tipos de fracturas:

- I. Fracturas de extensão paralelas à direcção da tensão máxima principal no centro do corpo de prova, ficando os topos do corpo de prova sem fracturas, formando dois cones opostos pelos vértices. Este é o tipo de rotura confinada ou por esmigalhamento;
- II. Uma ou mais fracturas de extensão paralela à direcção da tensão máxima principal começando nos topos do corpo de prova. Este é o tipo de rotura por descoesão ou lascamento;
- III. Fracturas de corte conjugadas, formadas a menos de 45° da direcção da tensão máxima que intersecta o ângulo entre essas fracturas conjugadas. Este é o tipo de rotura por corte.

O primeiro tipo de rotura é o mais frequente e deve-se à restrição que os pratos da prensa impõem à expansão dos topos do corpo de prova. O ângulo apical do cone (na rotura) formado é função da altura da amostra. O segundo tipo de rotura é observado quando a restrição da expansão dos topos é eliminada. O terceiro caso de rotura é característico do sistema de aplicação da carga.

Na Tabela 7, pode-se observar os valores da resistência à compressão simples e resistência à tracção para os diferentes tipos de rocha.

Rocha intacta	Resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ) [MPa]		Resistência à tracção ( $\sigma_T$ ) [MPa]
	Valores médios	Classe de valores	
Andesito	210 – 320	100 – 500	7
Anfibola	280	210 – 530	23
Anidrite	90	80 – 130	6 – 12
Arenito	55 – 140	30 – 235	5 - 20
Basalto	150 – 215	80 – 350	5 – 25
Cal	80 – 140	60 – 200	4 – 30
Quartzito	200 – 320	100 – 500	10 – 30
Diorito	240 – 350	130 – 365	55
Diorite	180 – 245	120 – 335	8 – 30
”Dolerita”	200 – 300	100 – 350	15 – 35
Dolomite	90 – 250	65 – 350	5 – 25
Xisto	50 – 60	20 – 160	2 – 5,5
Gabro	210 – 280	180 – 300	14 – 30
Gneisse	160 – 200	85 – 250	5 – 20
Granito	170 – 230	100 – 300	7 – 25
Grauvaques	180	80 – 220	5,5 – 15
“Limolita”	---	35 – 250	2,7
“Lutita”	30 – 70	10 – 100	1,5 – 10
Marga	70 – 140	70 – 190	---
Mármore	120 – 200	60 – 250	6,5 – 20
Ardósia	100 – 180	90 – 250	7 – 20
Sal	12	5 – 30	---
“Toba”	---	10 – 46	1 – 4
Gesso	25	10 – 40	1 – 2,5

Tabela 7 - Valores de resistência da matriz rochosa sã. (adaptado: Vallejo, 2002).

## 2.3 EFEITO DE ESCALA E RESISTÊNCIA

Segundo Hoek, *et al*, (2002), a superfície de rotura de um talude pode consistir num único plano contínuo ou numa superfície complexa de vários sistemas de descontinuidades dentro do maciço rochoso. A escolha do valor apropriado da resistência à rotura, não depende só da disponibilidade dos dados de ensaios, mas também de uma atenta interpretação dos mesmos para clarificar o comportamento do maciço rochoso. Nestes casos, a determinação de resultados fiáveis da resistência é um aspecto crítico durante um projecto do talude, pois mudanças da resistência de rotura, pode resultar em mudanças significativas na segurança, altura e ângulo do talude.

De acordo com Hoek, *et al*, (2002), a selecção da resistência apropriada para um talude, vai depender em grande medida na escala relativa entre a superfície de escorregamento e as estruturas geológicas presentes no maciço rochoso. Por exemplo na Figura 3, a dimensão que engloba todo o talude é maior que a longitude das descontinuidades. Assim, qualquer superfície potencial de rotura passa dentro do maciço rochoso fracturado e pode ser usada no projecto do talude para resistência de rotura do maciço rochoso.

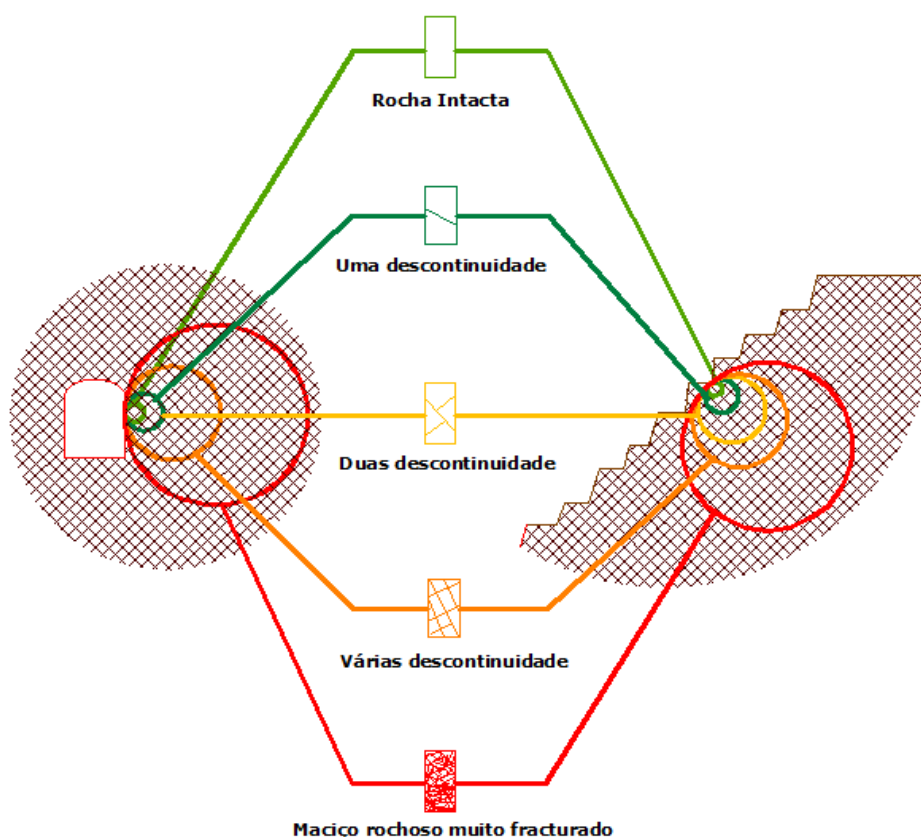


Figura 3 – Transição entre a rocha intacta e o maciço rochoso muito fracturado tendo em conta o tamanho da amostra analisada. (Hoek, *et al* 2002).

Para uma escala menor que o espaçamento das descontinuidades, onde se encontram os blocos intactos da rocha, pode-se usar a resistência da rocha intacta (matriz rochosa) na avaliação da perfuração e desmonte das rochas. A própria matriz rochosa, apesar de se considerar mecanicamente contínua, apresenta um comportamento heterogéneo e anisotrópico ligado à sua origem e microestrutura mineral

**Matriz rochosa** é o material rochoso que não apresenta descontinuidades, ou seja, os blocos de rocha intacta. Geralmente caracterizam-se pelo seu peso específico, deformabilidade e resistência.

**Descontinuidade** é qualquer plano de origem mecânica presente num maciço rochoso, geralmente com uma resistência à tracção muito baixa ou quase nula. A presença de descontinuidades implica um comportamento não uniforme do maciço rochoso.

**Maciço rochoso** é o conjunto da matriz rochosa e descontinuidades. A presença de descontinuidades de diversos tipos confere ao maciço rochoso um carácter heterogéneo e um comportamento não uniforme, condicionado pela natureza, frequência e orientação dos planos de descontinuidades e condiciona o seu comportamento geomecânico e hidráulico.

Todos estes elementos, constituem em conjunto a estrutura rochosa, e influenciam o comportamento global do maciço rochoso, predominando mais um ou outro componente em função das suas respectivas propriedades e da escala em que o maciço é estudado.

Ainda, segundo com Hoek, *et al*, (2002), para além das propriedades intrínsecas do maciço rochoso associadas às características da matriz rochosa e das descontinuidades, que definem em grande parte a sua resistência, existem outros factores que influenciam o seu comportamento geotécnico, tais como:

- As tensões naturais (estado de tensão);
- Os factores geoambientais;
- Estruturas tectónicas e sedimentares.

Baseados nos efeitos de escala e as condições geológicas, pode-se usar a resistência apropriada em concordância com os objectivos requeridos, no caso se a rotura ocorre ao longo das superfícies das descontinuidades presentes, ou através do maciço rochoso.

A resistência à rotura da descontinuidade pode ser obtida no campo ou em laboratório, e a resistência à rotura do maciço rochoso pode ser determinada por métodos empíricos que envolvem um dos dois: retro-análises em condições geológicas similares, ou estimadas pelos índices da resistência da rocha.

A determinação da resistência à compressão uniaxial visa o estabelecimento de um critério que venha a fazer parte de uma classificação geomecânica que permita efectuar o zonamento de núcleos de maciços rochosos.

No Quadro 3 apresenta-se um resumo de expressões encontradas na bibliografia consultada, em que os vários trabalhos experimentais elaborados pelos diversos autores, têm como objectivo efectuar o zonamento de núcleos de um maciço onde se desenvolveram projectos de escavações subterrâneas, torna-se então fundamental o dimensionamento de pilares esbeltos para que se obtenham taxas de recuperação o mais elevadas possível, para que se torne economicamente viável a exploração mineira.

Para o cálculo da resistência dos pilares é fundamental não só conhecer a resistência à compressão simples do material que os compõe ( $\sigma_c$  nas expressões apresentadas no Quadro 3), mas sobretudo conhecer a capacidade resistente do pilar ( $\sigma_r$  nas expressões referidas no Quadro 3) em função da geometria do pilar.

Compreende-se assim que para estas análises sejam imprescindíveis a realização de ensaios laboratoriais de compressão uniaxial que reflectam exactamente a adopção de diferentes geometrias (diferentes esbeltezas, isto é, diferentes relações altura/diâmetro ou aresta, e diferentes volumes) para os provetes a ensaiar.

Um número significativo de autores tem reflectido e executado experiências laboratoriais e *in situ* sobre estas matérias, no sentido de compreender como é afectada a resistência dos pilares pela sua geometria; destes destacam-se: Holland, Obert & Duval, Bieniawski, Greenwald *et al*, Salamon & Munro, Wilson, Sheorey, Hardy e Agapito, *in* Sheorey, (1993) As diversas leis de variação que se obtiveram apresentam-se no Quadro 3.

Autores	Equações
Holland & Gaddy, Steart	$\sigma_r = 0,16\sigma_c \frac{a^{0,5}}{L}$
Obert & Duval	$\sigma_r = \sigma_c \left( 0,78 + 0,22 \frac{a}{L} \right) *$
Greenwald <i>et al</i>	$\sigma_r = 0,67\sigma_c \frac{a^{0,5}}{L^{0,83}}$
Bieniawski	$\sigma_r = \sigma_c \left( 0,64 + 0,36 \frac{a}{L} \right)$
Bieniawski (modificado)	$\sigma_r = \sigma_c \left( 0,64 + 0,36 \frac{a}{L} \right)^{1,4} **$
Salamon & Munro	$\sigma_r = 7,2 \frac{a^{0,46}}{L^{0,66}}$
Salamon & Munro (generalizada)	$\sigma_r = 0,79\sigma_c \frac{a^{0,46}}{L^{0,66}}$
Salamon	$\sigma_r = 0,79\sigma_c \frac{\left(\frac{a}{L}\right)^{0,59}}{V_p^{0,067}} \left( 0,24 \left[ \left(\frac{a}{5L}\right)^{2,5} - 1 \right] + 1 \right) ***$
Wilson	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>caso em que a &gt; 2x</u> *</li> </ul> $\sigma_r = \frac{4\gamma H}{a \cdot a_1} \left[ a \cdot a_1 - 1,5(a + a_1) \times LH \times 10^{-3} + 3L^2 H^2 \times 10^{-6} \right]$ <p>(pilares rectangulares a<sub>1</sub> – dimensão da aresta maior)</p> $\sigma_r = \frac{4\gamma H}{a \cdot a_1} (a - 1,5LH \times 10^{-3})$ <p>(Pilares longos)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>caso em que a &lt; 2x</u></li> </ul> $\sigma_r = 667\gamma \frac{a}{a_1 H} \left( a_1 - \frac{a}{3} \right)$ <p>(Pilares rectangulares)</p> $\sigma_r = 667\gamma \frac{a}{H}$ <p>(Pilares longos)</p>
Sheorey <i>et al</i>	$\sigma_r = 0,66\sigma_c L^{-0,35} + 6,3 \left[ k\gamma H \left( 1 - e^{-(1,5a)/(25+0,1H)} \right) \right]^{0,8}$
Sheorey <i>et al</i>	$\sigma_r = 0,27\sigma_c L^{0,36} + \frac{H}{160} \times \left( \frac{a}{L} - 1 \right)$
Sheorey <i>et al</i>	$\sigma_r = 0,27\sigma_c \frac{a^{0,5}}{L^{0,86}}$
Hardy e Agapito	$\frac{\sigma_r}{3100} = \left( \frac{21,6 \times 10^4}{V_p} \right)^{0,118} \times \left( \frac{aL}{3600} \right)^{0,833}$

\* Esta expressão foi apresentada por Baushinger (LOGIE & MATHESON, 1983).

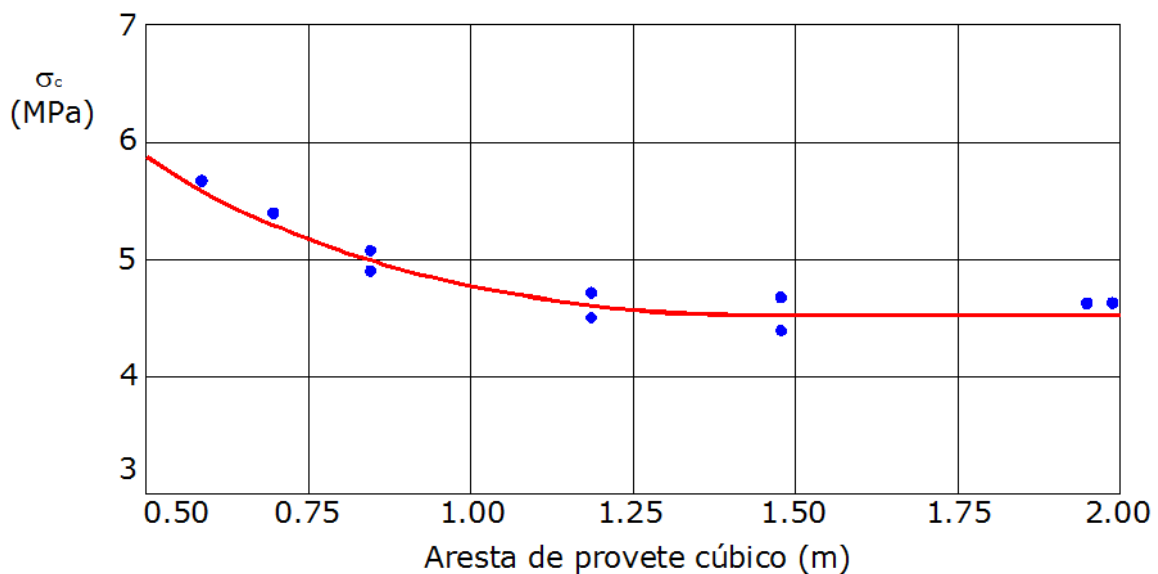
\*\* Particularização para a/L>5.

\*\*\* Esta expressão resultou de retroanálises para pilares com a/L>5.

Em todas as expressões a, L e V,  $\sigma_c$  e  $\sigma_r$  representam respectivamente a aresta, altura, volume, resistência à compressão simples e capacidade resistente do pilar.

**Quadro 3 – Resumo das leis de variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria dos provetes ensaiados. (adaptado: Sheorey, 1993).**

São também conhecidos, os resultados da variação da resistência à compressão simples com a dimensão da aresta, obtidos por Bieniawski num estudo efectuado em 1969, com provetes cúbicos de carvão. No entanto este estudo, tal como os outros anteriormente referidos, apenas atende à influência de um dos dois efeitos geométricos considerados, que são o volume estudado através da dimensão da aresta e a esbeltez (quociente da altura do provete pela sua aresta). Constatou o autor, a diminuição da resistência à compressão simples com o aumento da aresta, esta variação é atribuída à maior probabilidade de encontrar defeitos sobre maiores volumes, verificou também, que a resistência à compressão diminuía até ao cubo de aresta 1,5 metros e que a partir dessa dimensão a resistência à compressão se mantinha praticamente constante com o aumento do cubo, tal como se pode observar na Figura 4.



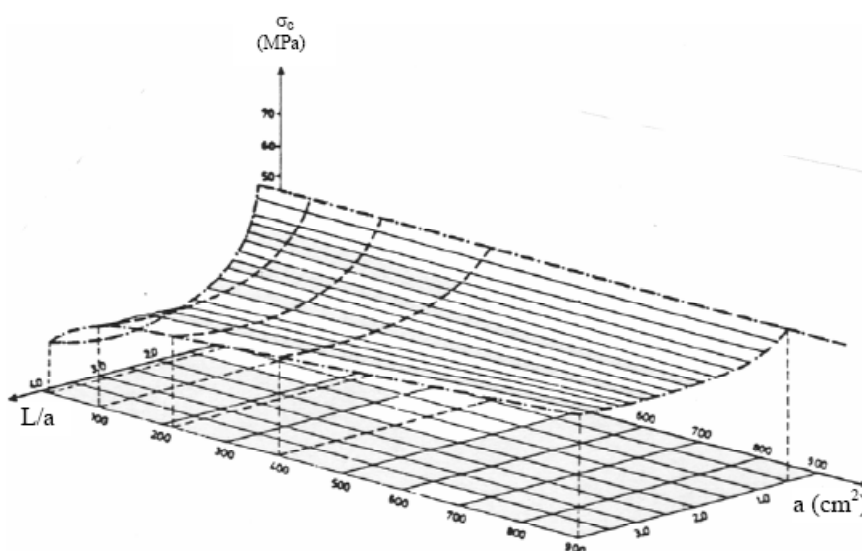
**Figura 4 – Variação da resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos de carvão,  $\sigma_c$ , com o comprimento da aresta dos provetes.** (adaptado: Bieniawski, 1969).

Idêntico comportamento é possível observar quando se analisa a variação da resistência à compressão uniaxial das rochas em função da esbeltez do provete, ou seja, à medida que se aumenta a razão entre a altura e o diâmetro.

Posteriormente Jackson e Lau (1990), concluíram pela existência de outros factores que contrariam a lei de variação à compressão com a diminuição da aresta obtida por Hoek e Brown (1980) (semelhante à obtida por Bieniawski), quando se ensaiam provetes de dimensão inferior a 63 mm.

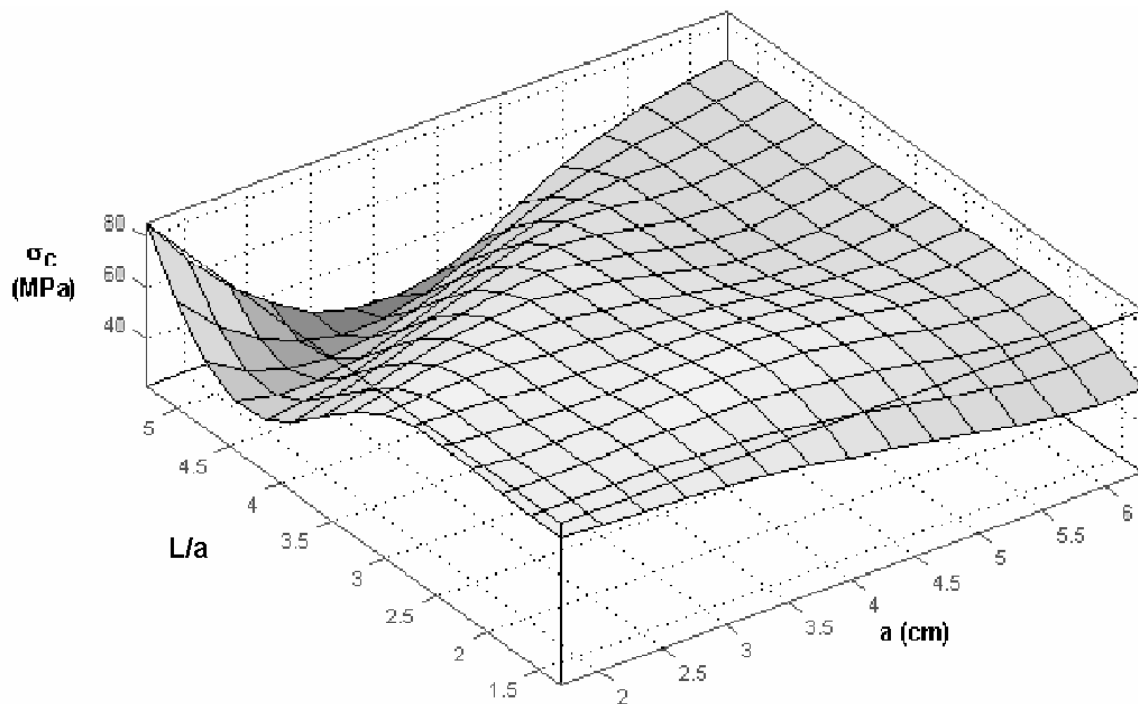
As análises que têm vindo a ser referidas contemplam apenas o chamado efeito de escala, que respeita normalmente apenas ao estudo do efeito volumétrico (normalmente representado pela variação da resistência com a dimensão aresta/ diâmetro), contudo a variação da resistência com a esbeltez deve ser encarada como um efeito geométrico e por isso também, como um efeito de escala.

Efectivamente, foram também conduzidos inúmeros estudos com o intuito de avaliar a variação da resistência com a esbeltez, que forneceram as diferentes leis que se encontram sintetizadas nas expressões apresentadas anteriormente. No entanto nota-se que as análises onde se contemplem simultaneamente os efeitos do volume e da esbeltez não são comuns, havendo apenas referência a algumas tentativas de estabelecimento de leis de variação da resistência à compressão uniaxial com estas duas características geométricas, exemplos destas tentativas são os resultados obtidos em amostras de sal-gema que se apresentam na Figura 5.



**Figura 5 – Variação da resistência à compressão uniaxial com a modificação das dimensões das amostras (Charrua-Graça, 1986).**

Matilde M. H. (2000), no âmbito do projecto de caracterização de núcleos do maciço Borba, Vila Viçosa, Estremoz, com vista ao seu zonamento, têm vindo a ser ensaiados provetes de mármore com diferentes volumes e esbeltez, pretendendo como se referiu, poder tirar algumas informações úteis no que concerne ao posterior dimensionamento dos pilares. Os resultados seleccionados para apresentação referem-se a amostras de mármore branco sem veios, e as variações da resistência à compressão uniaxial com os dois efeitos geométricos atrás enunciados apresentam-se na Figura 6.



**Figura 6 – Variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria dos provetes ensaiados.**  
(Matilde M.H., 2000)

Segundo Matilde M.H. (2000), esta lei de variação deve ainda ser encarada com alguma reserva, esperando-se que a envolvente de resistência venha a sofrer ajustes com o aumento de informação que se obterá com a continuação dos ensaios nomeadamente no domínio da esbelteza elevada (domínio das esbeltezas 4 e 5), onde o número de ensaios é ainda reduzido relativamente ao volume de informação já obtido para a esbelteza da ordem dos 2,5 e 3. Pensa-se que é aliás esta a razão para a subida aparente da resistência para valores da esbelteza da ordem de 6.

De facto, a análise dos resultados obtidos para provetes de esbelteza elevada, aos quais se fizeram corresponder baixos valores de aresta, situação similar aquela que se verificaria na prática, revelaram uma diminuição relativamente grande da resistência à compressão uniaxial face ao aumento da esbelteza, embora não tão drástica quanto seria de esperar nos domínios das arestas mais elevadas.

A distribuição de esforços varia com a geometria do provete, a causa desta variação deve-se principalmente à fricção entre o provete e a placa de aplicação da carga. As Figuras 7 e 8 mostram de um modo genérico os efeitos da relação altura/diâmetro,  $L/D$ , (esbelteza) e a diferença de tamanho dos provetes. A resistência à compressão simples diminui com o aumento do volume do provete e com a esbelteza. O efeito de concavidade

que aparece no início do comportamento elástico na curva tensão-deformação, pode ser consideravelmente reduzido se as faces do provete tiverem o mais paralelo possível.

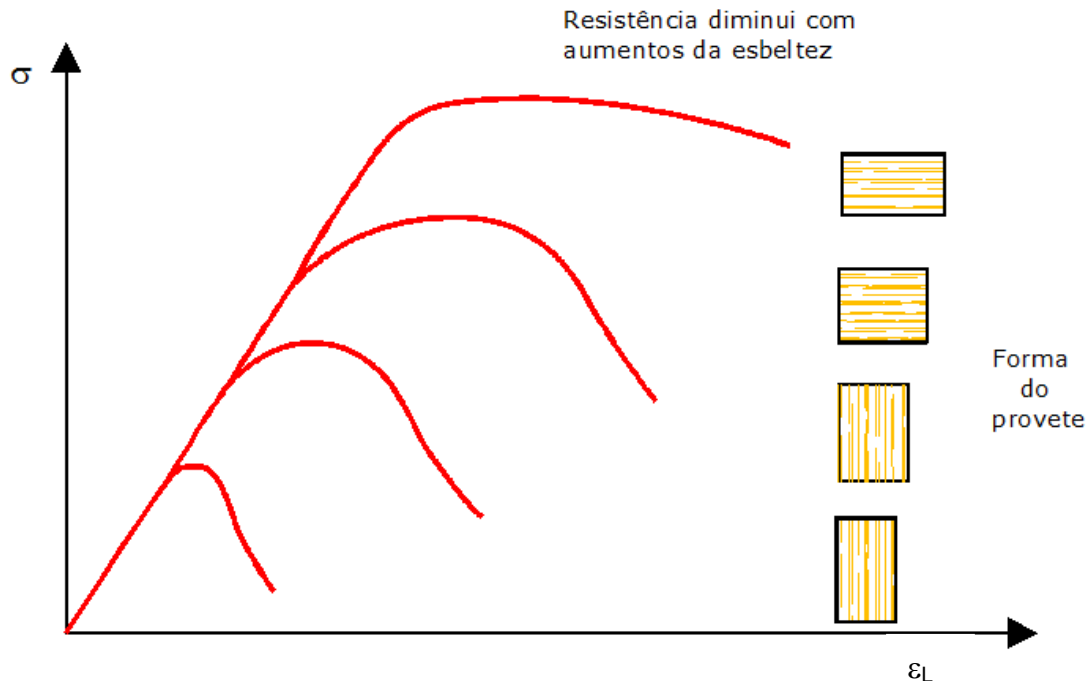


Figura 7 – Variação da resistência à compressão simples com o aumento da esbeltez dos provetes. (adaptado: Vallejo, 2002).

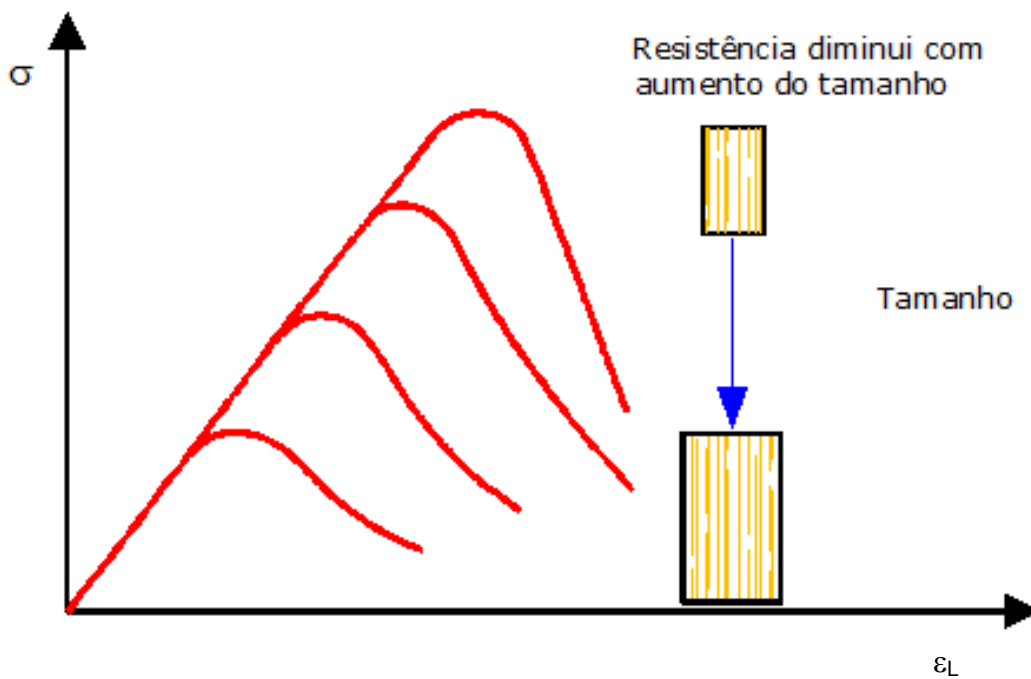
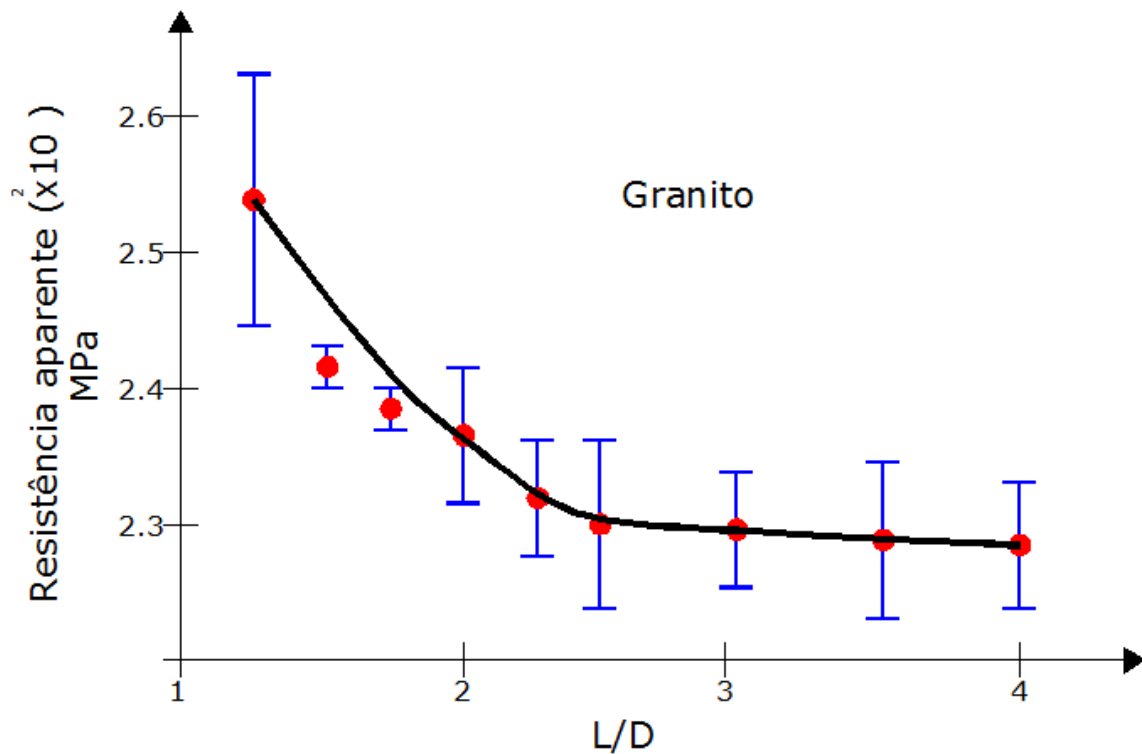


Figura 8 - Variação da resistência à compressão simples com o aumento do provete. (adaptado: Vallejo, 2002).

Pode-se também referir a experiência laboratorial elaborada por Mogi (1966), em provetes de dolomite e granito, onde o autor conclui que a distribuição das tensões nos corpos de prova em que a relação altura/diâmetro (L/D) é baixa tende a ser triaxial e exibem alta resistência à compressão simples, enquanto que os corpos de prova com relação (L/D) alta, fracturam por lascas, devido à instabilidade elástica.

Através da figura representada a seguir, verifica-se que a resistência à compressão simples é bem mais elevada para valores de (L/D) baixos e decresce a partir da relação (L/D) = 3.



**Figura 9 – Relação altura/diâmetro (L/D) e a resistência à compressão simples de provetes de granito.**  
(Mogi, 1966, adaptado: *in* Ladeira, 1986).

Para terminar, seguem-se algumas equações empíricas, encontradas na bibliografia consultada, em que os autores basearam-se em ensaios realizados em laboratório, onde relacionam a resistência à compressão simples ( $\sigma_c$ ), com a relação altura/diâmetro (L/D).

- **Bunting (1911)**

$$\sigma_c = 700 + 300 \times \left(\frac{D}{L}\right)$$

**Equação 13 - Equação de Bunting.** ( *in* Ladeira, 1986).

Em que:

$\sigma_c$  – Vem em 1b/pol<sup>2</sup>;

$D$  – Diâmetro em polegadas;

$L$  – Altura em polegadas.

- **Beckman (1963)**

$$\sigma_c = a \times \left(\frac{D}{L}\right)^b + c$$

**Equação 14 - Equação de Beckman.** ( *in* Ladeira, 1986).

Em que:

$a$  = Constante, 900 a 2400 1b/pol<sup>2</sup>;

$b$  = Constante, 1.1 a 2.1;

$c$  = Constante, 2200 a 3700 1b/pol<sup>2</sup>

- **ASTM (1942)**

Para calcular a resistência de corpos de prova para a relação L/D=1, a ASTM (1942) estabeleceu a seguinte equação:

$$\sigma_{c1} = 1.15\sigma_c \quad \text{ou} \quad \sigma_c = 0.85\sigma_{c1}$$

**Equação 15 - Equação de ASTM.** (*in* Ladeira, 1986).

Em que:

$\sigma_{c1}$  - Resistência do corpo de prova com L/D =1;

$\sigma_c$  - Resistência do corpo de prova com L/D = 2.5.

- **Protodyakonov (1969)**

Para calcular a resistência de corpos de prova para a relação L/D=2, Protodyakonov (1969) estabeleceu a seguinte equação:

$$\sigma_{c2} = 8\sigma_c \left( 0.143 + 0.5 \times \left(\frac{L}{D}\right) \right)$$

**Equação 16 - Equação Protodyakonov.** (*in* Ladeira, 1986).

### 3. CASO DE ESTUDO E METODOLOGIA APLICADA

Tendo em conta os objectivos propostos para o presente estudo, definiu-se uma cronologia de trabalhos para efectuar ao longo da dissertação. Neste sentido, iniciou-se a pesquisa bibliográfica, que teve como finalidade aprofundar o conhecimento sobre as temáticas relacionadas com o tema da dissertação, tais como: a caracterização de maciços rochosos, tipos de ensaios e propriedades que os caracterizam, a influência do efeito de escala na caracterização geomecânica de maciços rochosos, assim como a procura das normas que regem os vários ensaios laboratoriais.

Após a fase inicial foi definido o caso de estudo prático, que tem como propósito submeter vários provetes de granito de diferentes geometrias, a ensaios laboratoriais, onde se possam obter as propriedades físicas e mecânicas dos diferentes provetes, assim como constatar a influência dos efeitos de escala devido à variação geométrica na caracterização geomecânica das rochas e maciços rochosos.

#### 3.1 AMOSTRAGEM, LOCALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Na obtenção dos provetes para a realização dos ensaios, um dos aspectos mais importantes refere-se à recolha de amostras representativas do maciço rochoso que sejam intactas, sem fissuração ou fracturação interna que possam alterar ou condicionar as condições significativamente os resultados.

A escolha do local de amostragem foi condicionada por diversos factores, tendo em vista os ensaios a pretendidos. Considerando as características dos provetes a realizar, limitadas pelo equipamento disponível, nomeadamente o de recolha, corte e preparação, optou-se pela utilização de dois tipos de amostragem.

A **primeira amostragem**, tem origem num afloramento de uma pedreira do distrito da Guarda, mais propriamente do concelho de Pinhel e freguesia de Freixedas, onde a rocha granítica explorada apresenta-se em "bolas" de grande tamanho, ocorrentes à superfície do maciço e o granito comercializado tem a designação de "*Granito Ricão*", os corpos de prova desta amostra são todos de forma prismática.

A **segunda amostragem**, é proveniente de uma sondagem mecânica à rotação (AC1) do local Cró, concelho de Sabugal e distrito da Guarda. Os corpos de prova foram recolhidos entre os 62 e 65 metros de profundidade do maciço rochoso granítico, e posteriormente foram disponibilizados para os ensaios laboratoriais.

Na Figura 10 é possível observar o enquadramento geográfico das amostras recolhidas, e na Figura 11 a extração de um bloco de granito “Ricão” no afloramento da pedra nas Freixedas, (amostra 1).

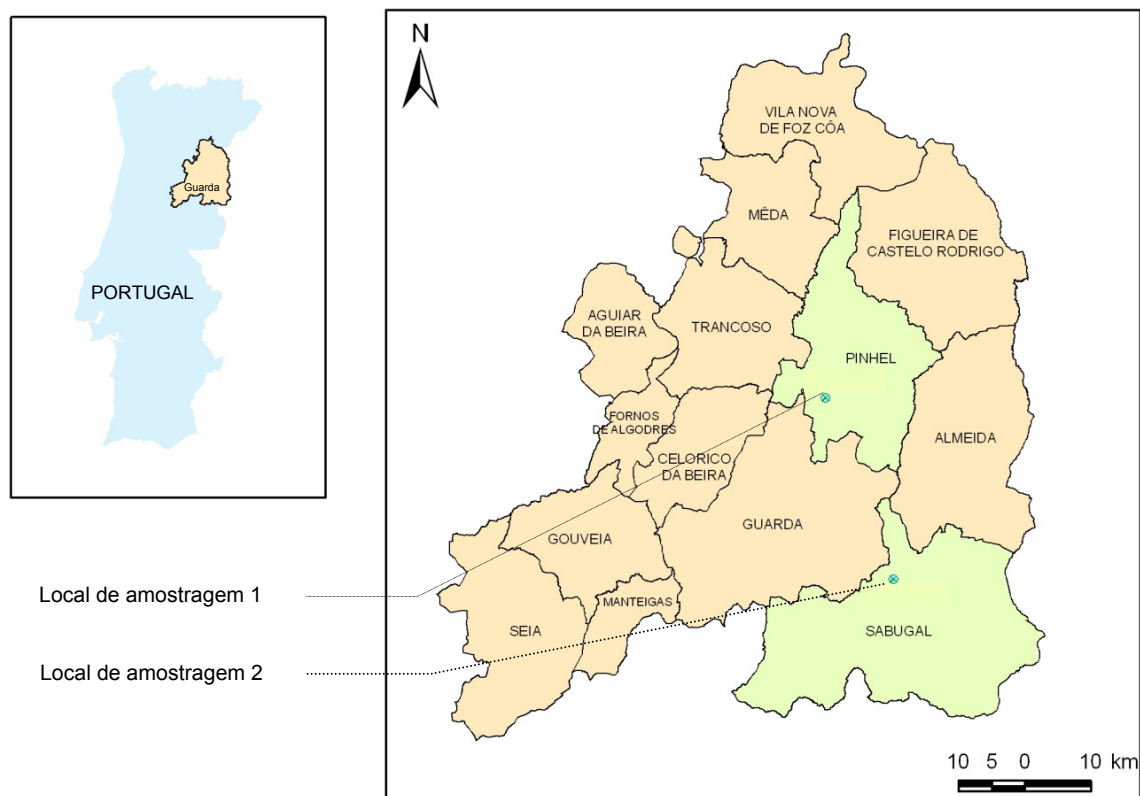


Figura 10 – Enquadramento geográfico dos locais de amostragem.



Figura 11 – Obtenção de um grande bloco de “granito Ricão” na pedra, (Amostragem 1).

Na Figura 12, visualiza-se o local de recolha da amostragem 1, na Figura 13 encontra-se o enquadramento geológico da amostragem 1, que corresponde a uma zona de predominância de granito de grão médio de tendência porfíróide.

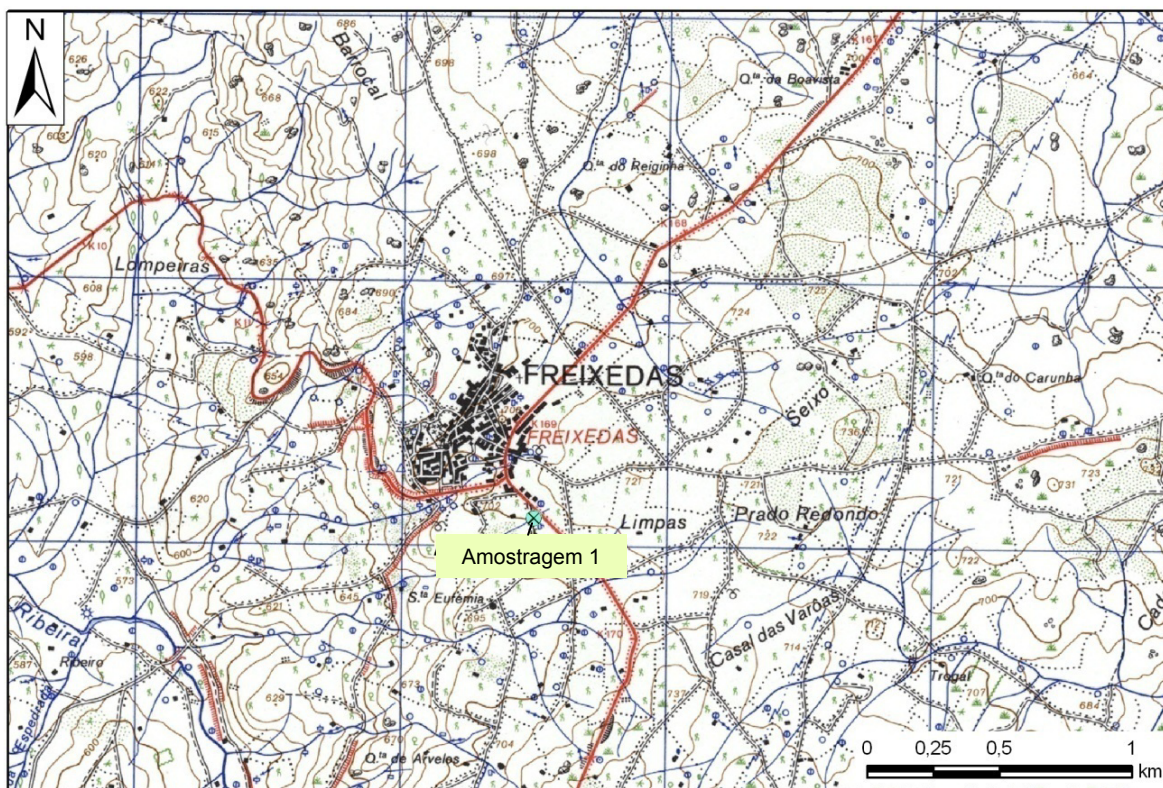


Figura 12 – Localização geográfica da amostragem 1. (extracto da carta militar n.º 182, IGeoE).

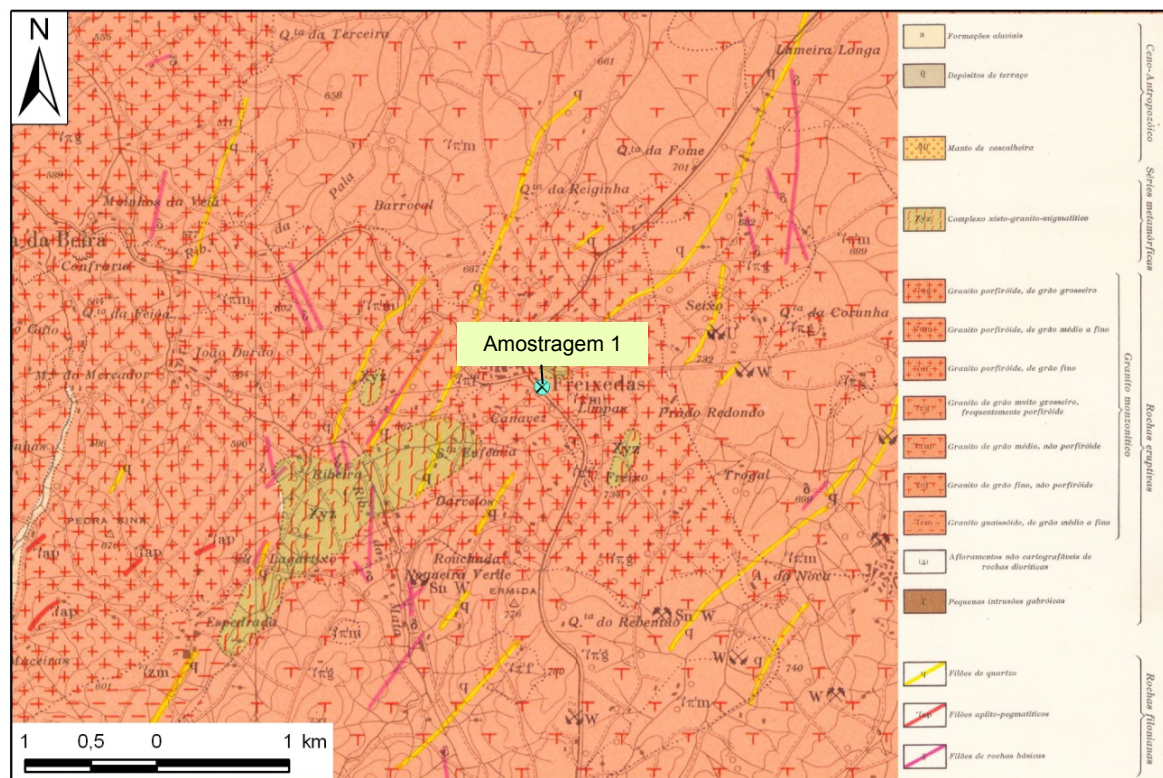


Figura 13 – Enquadramento geológico da amostra 1. (Extracto da carta geológica n.º 18A, IGM).

Na Figura 14, visualiza-se o local de recolha da amostragem 2, na Figura 15 encontra-se o enquadramento geológico da amostragem 2, que corresponde a uma zona de predominância de granito porfíróide de grão grosseiro a médio.



Figura 14 – Localização geográfica da amostragem 2. (extracto da carta militar n.º 215, IGeoE).

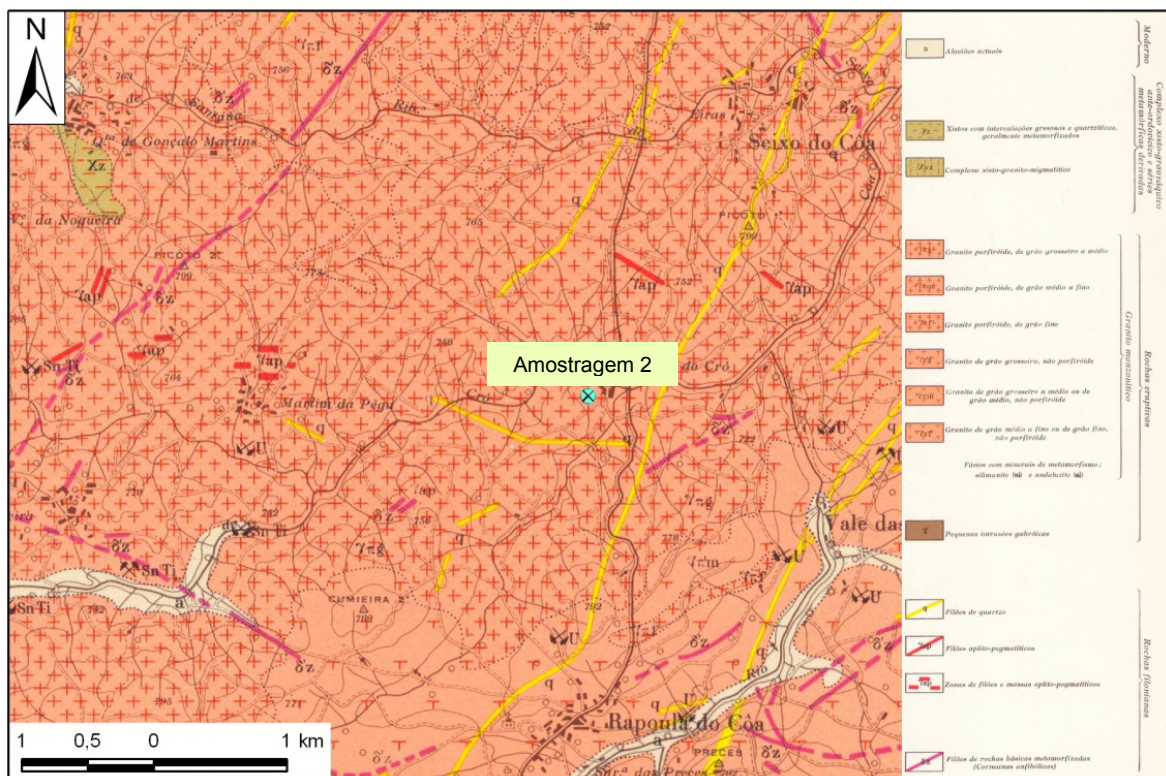


Figura 15 – Enquadramento geológico da amostragem 2. (Extracto da carta geológica n.º 18C, IGM).

Na Figura16 observa-se, a caixa com carotes provenientes da sondagem mecânica à rotação efectuada no Cró, donde foram extraídos os corpos de prova para os ensaios laboratoriais.



**Figura 16 – Caixa nº 15 da sondagem à rotação AC1 – Cró.**



Após a recolha das respectivas amostragens, efectuou-se no laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, da Universidade da Beira Interior, a preparação e corte dos provetes da amostragem 2, com as dimensões seleccionadas, como se observa na Figura 17. Em relação aos provetes da amostragem 1 foram serrados e preparados na mesma empresa que os extraiu da pedraira “Granitos e Mármore Marujo”, com as dimensões previamente estabelecidas.



**Figura 17 – Preparação e corte dos provetes da amostragem 2.**

Posteriormente ao corte e preparação do provetes obtidos foram inspeccionados visualmente quantos às dimensões pretendidas e paralelismo de faces, assim como a perfeição das arestas. Após esta análise primária de um modo visual constatou-se que todos os provetes garantiam os requisitos mínimos, faces paralelas e medidas pré-definidas, passando-se logo de seguida à fase de rotulagem e numeração de todos os provetes de acordo com a designação pretendida por forma a dar seguimento aos ensaios laboratoriais.

No Quadro 4, apresenta-se a numeração e a designação atribuída a cada um dos grupos de provetes disponíveis para os ensaios laboratoriais, assim como a respectiva quantidade e dimensão.

Origem		Tipo e Designação	Nº de Provetes	Dimensão (cm)		Geometria
				L	D	
Amostragem 1	Pedreira Freixedas "Granito Ricão"	A <sub>i</sub>	10	5	5	 Prismática
		B <sub>i</sub>	11	10	5	
		C <sub>i</sub>	11	12.5	5	
		D <sub>i</sub>	10	15	5	
		E <sub>i</sub>	10	7	7	
		F <sub>i</sub>	10	14	7	
		G <sub>i</sub>	10	21	7	
		H <sub>i</sub>	11	10	10	
		I <sub>i</sub>	10	15	10	
		J <sub>i</sub>	10	20	10	
Amostragem 2	Sondagem à rotação "Cró"	i <sub>R_1</sub>	5	6.3	6.3	 Cilíndrica
		i <sub>R_1.5</sub>	5	9.5	6.3	
		i <sub>R_2</sub>	5	12.6	6.3	
		i <sub>R_2.5</sub>	4	15.8	6.3	
		i <sub>R_3</sub>	5	18.9	6.3	

Quadro 4 – Tipos de amostragem e designação dos grupos de provetes.

em que:

i – é a numeração atribuída aos provetes.

L – é a altura do provete;

D – é dimensão das arestas da base/topo ou diâmetro do provete.

Como se pode constatar no Quadro 4, existem 127 provetes disponíveis para os ensaios laboratoriais, entre os quais 15 grupos de diferentes dimensões e dois tipos de geometrias.

Nas Figuras 18 e 19, podemos observar alguns provetes obtidos das respectivas amostragens.



Figura 18 – Mostra de provetes obtidos da amostragem 1.

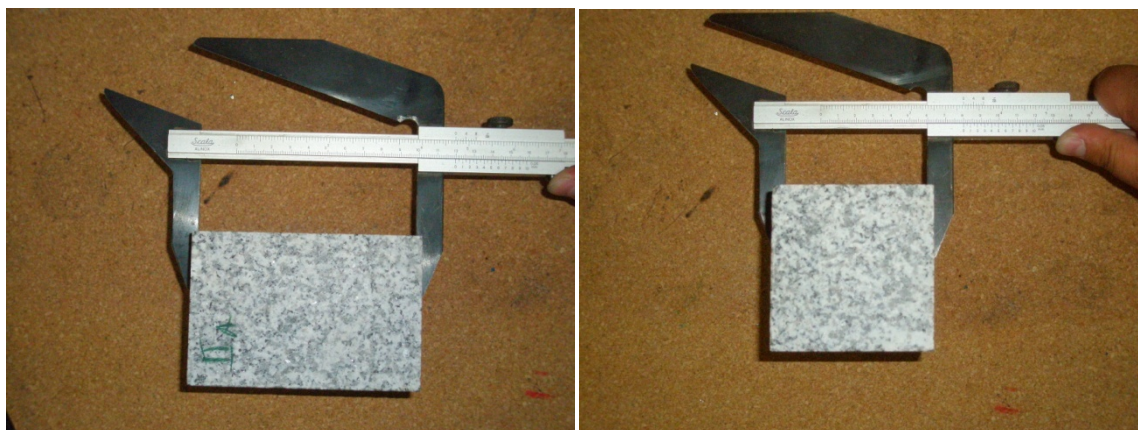


Figura 19 – Mostra de provetes obtidos da amostragem 2.

### 3.2 VERIFICAÇÃO DAS DIMENÇÕES E PARALELISMO DOS PROVETES

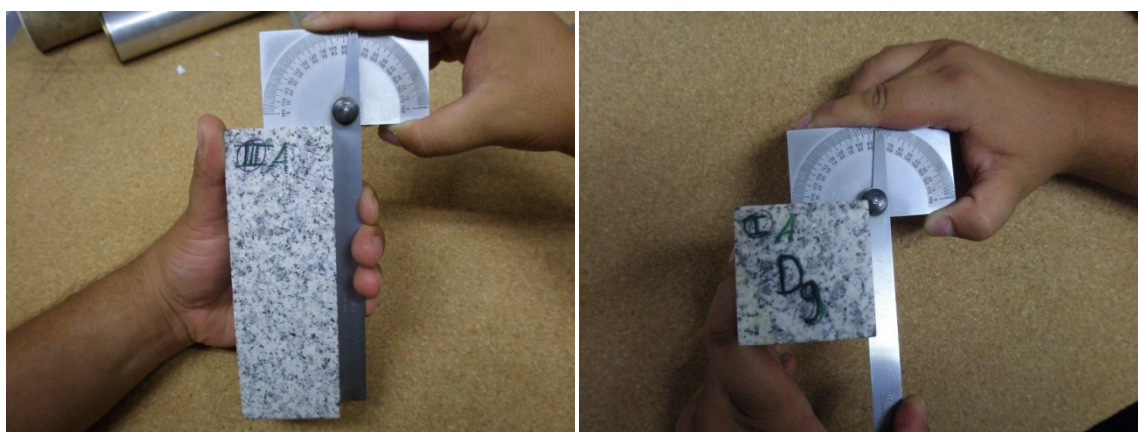
Após a identificação e marcação doo vários grupos de provetes, passou-se de seguida à etapa de verificação do comprimento de todas as arestas dos provetes. Neste sentido, foram retiradas as 12 medidas das arestas de cada provete, sempre em relação ao ponto médio das arestas perpendiculares, com o auxílio de um paquímetro de precisão 0.05 milímetros. Estas medições, para além de serem necessárias para determinar a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas e a área de compressão, dão-nos

também informações sobre o paralelismo existente entre as faces dos corpos de prova. Na Figura 20, podemos visualizar alguns pormenores das medições efectuadas. Após as medições, constatou-se que os provetes respeitam as recomendações feitas pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (I.S.R.M., 1978), já mencionadas no capítulo 2.



**Figura 20 – Verificação do comprimento das arestas do provete, com ajuda do paquímetro.**

No que diz respeito à verificação do paralelismo entre faces, foram também efectuadas 12 medições angulares entre as respectivas faces do provete como se apresenta na Figura 21. Verificou-se também que respeitam as recomendações sugeridas pela I.S.R.M. (1978).



**Figura 21 – Verificação dos ângulos entre as faces dos provetes para verificar o paralelismo com ajuda do goniómetro.**

Estando verificadas todas as recomendações sugeridas, os corpos de prova estão preparados para serem submetidos aos ensaios laboratoriais, de seguida será apresentada a metodologia adoptada na realização dos respectivos ensaios

### 3.3 DENSIDADE APARENTE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE ABERTA.

Os ensaios de caracterização física são muito importantes, tal como já referido anteriormente. A presença de poros na estrutura interna das rochas diminui a sua resistência e por conseguinte afecta o seu desempenho mecânico. As propriedades físicas, porosidade aberta, absorção de água e densidade, conjugadas podem fornecer informação adicional sobre o comportamento mecânico das rochas.

Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica das rochas no Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, da Universidade da Beira Interior seguindo a especificação do LNEC E 216-1968.

Para a realização destes ensaios, foi necessário utilizar uma balança electrónica, com sensibilidade de 0,1 gramas, e com possibilidade de realizar pesagens hidrostáticas, recipientes próprios para imersão dos provetes em ebulição e a respectiva placa de aquecimento, bandeja metálica para levar as amostras à estufa, tendo esta que garantir uma capacidade de atingir uma temperatura constante entre os 105°C e 110°C

O procedimento consistiu em limpar a superfície dos provetes com um pano de camurça para retirar as partículas de pó agarradas (Figura 22 a), de seguida levaram-se à ebulição durante 2 horas para saturar as amostras (Figura 22 b).



Figura 22 – Procedimento de limpeza seguido da imersão em ebulição das amostras.

Passado esse tempo, deixaram-se arrefecer até à temperatura ambiente do laboratório, seguidamente, registou-se a temperatura (Figura 23 a), De seguida, pesaram-se as amostras em suspensão hidrostática (peso imerso) (Figura 23 b).



Figura 23 – Procedimento de medição da temperatura e do peso do provete imerso.

Após a medição do peso do provete imerso, retirou-se o provete da água, limpou-se com um pano de camurça húmido de modo a remover a água superficial (Figura 24 a), De seguida, pesou-se de imediato (peso saturado) (Figura 24 b).

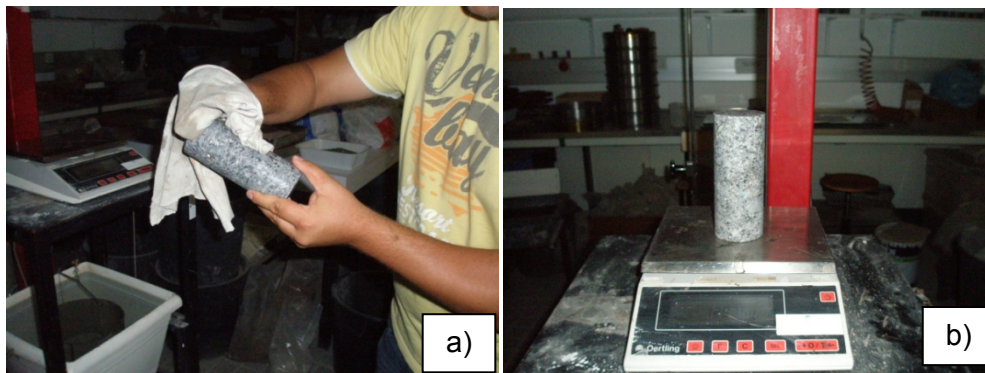


Figura 24 – Limpeza do provete e medição do peso saturado.

Posteriormente colocaram-se os provetes na estufa a 105°, durante 16 horas (Figura 25 a). De seguida, após o arrefecimento dos provetes à temperatura ambiente, pesaram-se de novo (peso saturado), (Figura 25 b).

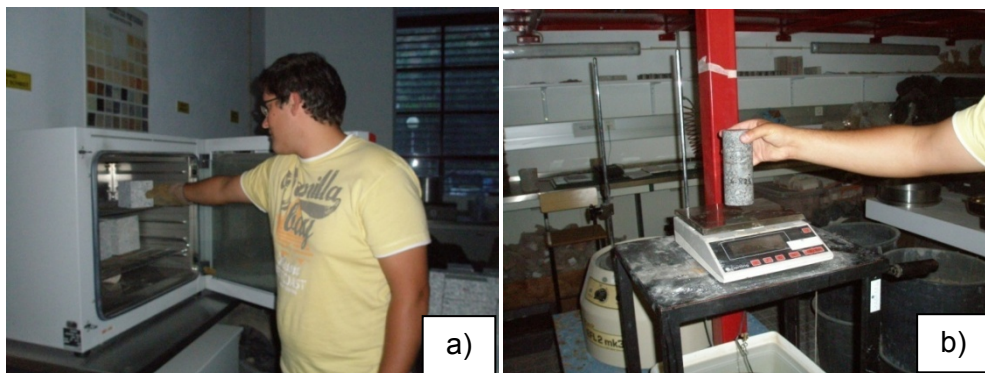


Figura 25 – Procedimento de colocação dos provetes na estufa e medição do peso do provete seco.

Utilizando os valores obtidos, foi determinada a densidade aparente seca, absorção de água e porosidade aberta, recorrendo às equações 3, 4 e 7 respectivamente, que foram apresentadas e descritas no capítulo 2.

Entre os tempos de saturação e secagem dos provetes, procedeu-se à realização do ensaio de medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, a seguir será apresentada a metodologia utilizada.

### 3.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÓNICAS

Para obter as constantes mecânicas dinâmicas destes geomateriais ensaiados, procedeu-se a testes não destrutivos de medição dos tempos das ondas ultrassónicas utilizando o aparelho “PUNDIT”. Posteriormente, foram calculados os valores dos módulos dinâmicos de elasticidade ( $E_d$ ), de rigidez ( $G_d$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu_d$ ).

O ensaio corrente, executado em materiais como o betão e rochas, consiste na medição de tempo de trânsito de um impulso ultrassónico gerado por um transdutor - emissor de cristal e recebido por um transdutor - receptor. A partir da distância recta percorrida e do tempo gasto no percurso determina-se o tempo de trânsito para a frequência utilizada.

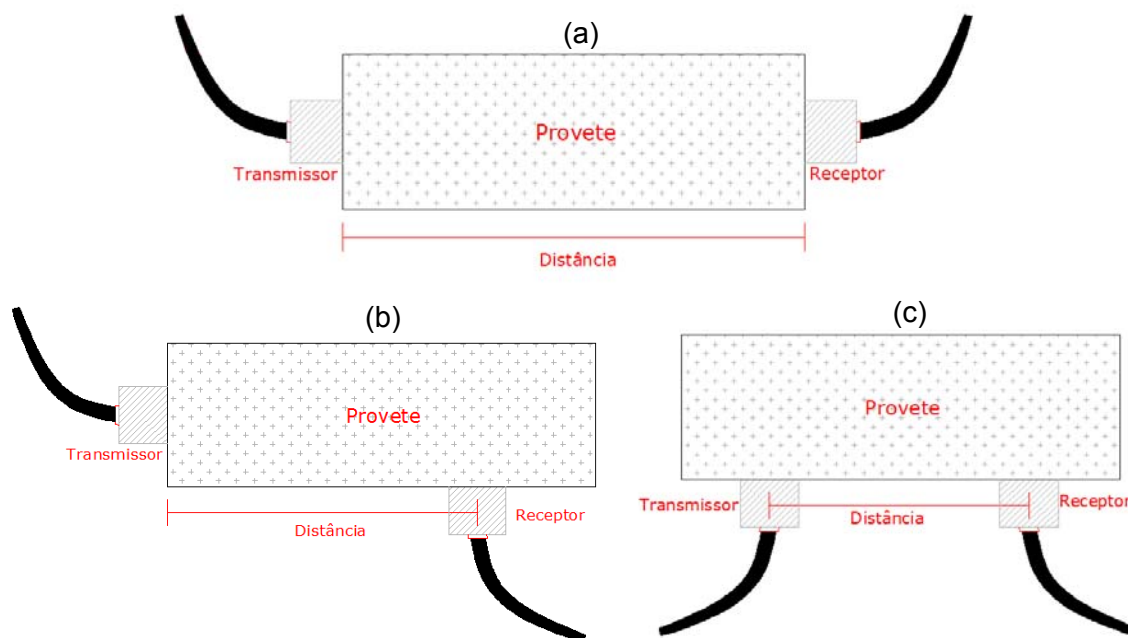
Os procedimentos de ensaio são descritos quer no manual do equipamento, Pundit Manual (1994), quer pela recomendação BS1881, B.S.I. (1986), para condições de humidade 0% e 100%, utilizando transdutores com frequência de 56Khz.

A velocidade de propagação das ondas ultrassónicas num corpo de prova rochoso é condicionada por factores que lhe são intrínsecos e por factores extrínsecos, associados às condições experimentais, Ferreira (2000).

<b>Factores intrínsecos</b>	• mineralogia
	• textura
	• peso específico
	• porosidade
	• anisotropia
<b>Factores extrínsecos</b>	▪ teor de humidade
	▪ contacto transdutores-amostra
	▪ temperatura
	▪ condição de extensão infinita

Quadro 5 - Factores que influenciam a propagação das ondas volumétricas num provete rochoso (adaptado: Ferreira, 2000).

Segundo a I.S.R.M. (1978), existem três possibilidades de medição das ondas ultrassónicas conforme a aplicação dos transdutores no corpo a medir: directo (a), indirecto (b) e semi-directo (c), conforme se observa na Figura 26.



**Figura 26 – Métodos para medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.** (adaptado: ISRM, 1978)

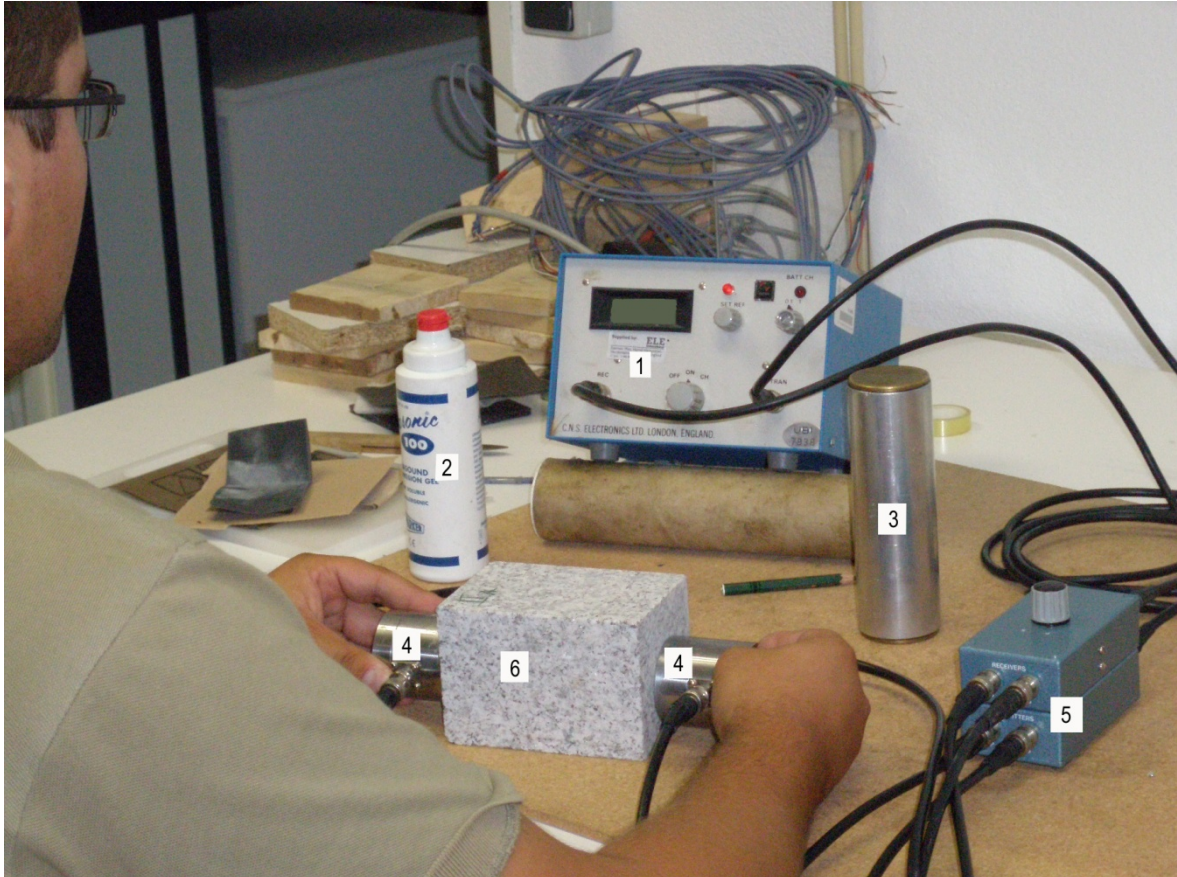
Dos três métodos o mais satisfatório é o directo, em que os transdutores se colocam paralelamente um ao outro, em faces opostas do corpo de prova e as ondas propagam-se perpendicularmente às faces dos transdutores. Este foi o método seguido neste estudo para todos os ensaios efectuados.

De referir a necessidade de assegurar um bom contacto entre a superfície da amostra e os transdutores para que se possa ter o mínimo de confiança nos resultados obtidos. Por essa razão e de acordo com as sugestões da ISRM (1978), utilizou-se um gel transmissor de ultra-sons, quer para as amostras secas ou saturadas.

Para os provetes prismáticos (amostragem 1), foram determinados os tempos de trânsito nas três direcções do corpo de prova, obtendo-se valores para as ondas P e S, no estado seco e saturado.

Relativamente aos provetes cilíndricos (amostragem 2), o procedimento foi idêntico aos anteriores, efectuando-se a determinação dos tempos de trânsito apenas numa direcção.

Na Figura 27, esta representado o equipamento que permite efectuar medições de ondas longitudinais (P) e de transversais (S). No entanto, a aplicação desta técnica apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente o facto de os impulsos serem gerados com uma energia significativamente inferior àquela obtida pela utilização dos transdutores simples (onda compressiva), pelo que apresenta uma dificuldade acrescida na detecção da frente de onda.



**Figura 27 - Procedimento e equipamento utilizado para medir a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas P e S.** (1 – PUNDIT; 2 - Gel transmissor de ultra-sons; 3 - Cilindro calibrador; 4 - Transdutor de ondas P e S; 5 – Comutador P/S; 6 - Provete ensaiado).

Os parâmetros físicos no caso do ensaio de velocidade da propagação dos impulsos ultrassónicos corrente, são obtidos através da seguinte formulação (BS 1881, Pundit Manual, 1994, Evangelista, 2002, Liang e Wu, 2002):

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}}$$

Onde:

$$K = \frac{(1 - \nu_d)}{(1 - \nu_d) \times (1 - 2\nu_d)}$$

**Equação 17 – Velocidade de propagação da onda ultassónica.** (Liang e Wu, 2002).

em que:

$V$  - Velocidade de propagação da onda, [ $\text{ms}^{-1}$ ];

$E_d$  - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, [GPa];

$\rho$  - Massa específica, [ $\text{Kgm}^{-3}$ ]

$\nu_d$  - Coeficiente de Poisson dinâmico.

Os parâmetros físicos dinâmicos são obtidos através das correlações para o caso dos equipamentos com separação de fonte em ondas longitudinais e transversais, (Taioli, 1999):

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu)}{\rho \times (1 - 2\nu_d) \times (1 + \nu_d)}}$$

**Equação 18 – Velocidade de propagação das ondas P,** (Taioli, 1999).

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu_d)}}$$

**Equação 19 - Velocidade de propagação das ondas S,** (Taioli, 1999).

$$G_d = \rho V_s^2$$

**Equação 20 - Módulo de elasticidade transversal dinâmico,** (Taioli, 1999).

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \times \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

**Equação 21 - Coeficiente de Poisson dinâmico,** (Taioli, 1999).

$$E_d = V_p^2 \rho \times \frac{(1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}{(1 - \nu)}$$

**Equação 22 - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico,** (Taioli, 1999).

em que:

$V_p$  - Velocidade de propagação das ondas P [ $\text{ms}^{-1}$ ];

$V_s$  - Velocidade de propagação das ondas S [ $\text{ms}^{-1}$ ];

$\nu_d$  - Coeficiente de Poisson dinâmico;

$E_d$  - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, [GPa];

$G_d$  - Módulo de distorção, ou módulo de elasticidade transversal, [GPa].

Considerando que:

$$V = \frac{L}{t}$$

**Equação 23 - Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.**

em que:

$V$  - Velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, [ $\text{ms}^{-1}$ ];

$L$  - Trajecto percorrido pelas ondas no corpo de prova, [m];

$t$  - Tempo, [s].

### 3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E DERFORMABILIDADE

Apresenta-se de seguida o procedimento de execução do ensaio de resistência à compressão uniaxial, ao qual foram submetidos os 127 corpos de prova. Destes, apenas 15 foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial com extensometria, com o objectivo de se conhecerem as extensões dos corpos de prova, e deste modo determinar as constantes mecânicas dos geomateriais em estudo.

No procedimento deste ensaio, foram seguidas as recomendações sugeridas pela Sociedade Internacional para a Mecânica das Rochas (I.S.R.M., 1978).

A velocidade de carregamento utilizada para levar à rotura os corpos de prova foi a seguinte:

- Provetes do grupo: (A), (B), (C), (D), (R1), (R1.5), (R2), (R2.5) e (R3) - 0.3 kN/s;
- Provetes do grupo: (E), (F) e (G) – 0.5 kN/s;
- Provetes do grupo: (H), (I) e (J) – 1 kN/s.



**Figura 28 – Procedimento e equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão uniaxial.**

Nos ensaios de resistência à compressão uniaxial com extensometria, a medição das extensões foi realizada, utilizando extensómetros eléctricos do tipo “TML STRAIN GAUGE TEST DATA”, produzidos pela empresa “Tokyo Sokki Kenyujo co., Ltd.” (Japan), recorrendo ao equipamento “TML – Computing datalogger TDS-602”, para efectuar o registo automáticos das extensões.

Na Figura 29, pode-se observar o procedimento e equipamento utilizado para a compressão uniaxial dos provetes, e registo de extensões.



**Figura 29 – Procedimento e equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão uniaxial com registo automático de extensões. (1 - Prensa hidráulica; 2 – Corpo de prova instrumentado e 3 – Registador computadorizado TML TDS-604)**

O módulo de deformabilidade (elasticidade ou de Young), é a razão entre a tensão axial aplicada e a deformabilidade axial produzida, pode ser calculado usando um dos seguintes processos (I.S.R.M., 1978):

- **Módulo de Deformabilidade Tangente, ( $E_T$ )**

É a razão entre a tensão axial aplicada (numa certa, percentagem da resistência à compressão simples,  $\sigma_c$ , normalmente de 50 %), e a deformação axial produzida pela tensão, como se pode observar através da Figura 30.

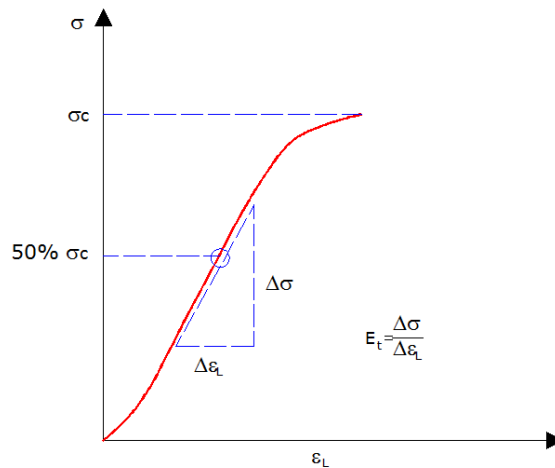


Figura 30 – Determinação do módulo de Young, tangente a uma percentagem arbitrária de  $\sigma_c$ .  
(adaptado: I.S.R.M., 1978).

- **Módulo de Deformabilidade Médio, ( $E_m$ )**

É a razão entre a média de valores correspondentes ao troço rectilíneo da curva tensão-deformação e a média das deformações nesse mesmo troço, Figura 31.

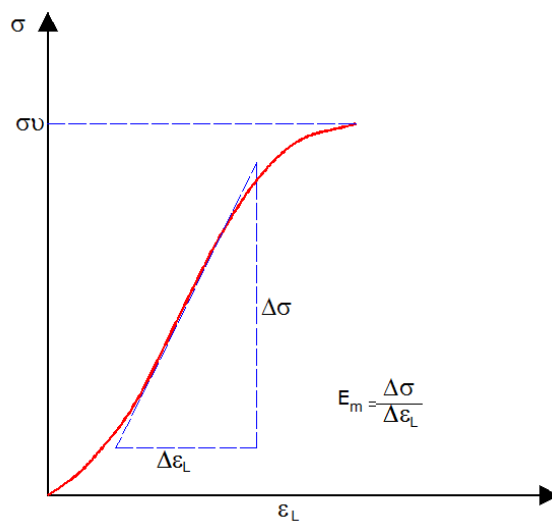
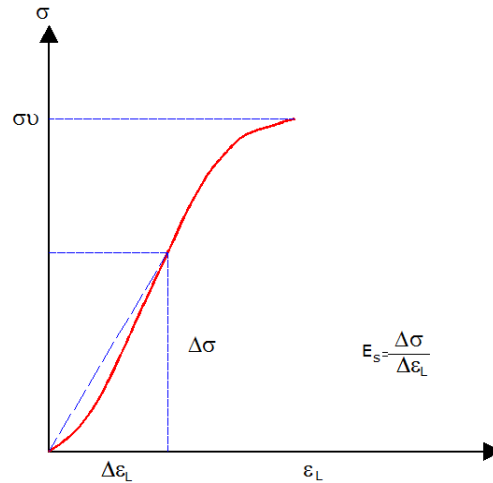


Figura 31 – Determinação do módulo de Young, média do troço rectilíneo. (adaptado: I.S.R.M., 1978).

- **Módulo de Deformabilidade Secante, ( $E_s$ )**

É a razão entre as diferenças de tensões axiais aplicadas entre dois pontos (em certas percentagens de resistência à compressão simples),  $\sigma_c$ , e as diferenças de deformação axiais produzidas por aquelas tensões pontos. Geralmente usa-se 50% da tensão de ruptura e o início do ensaio (Figura 32).



**Figura 32 – Determinação do módulo de Young, secante até uma percentagem arbitrária de  $\sigma_c$ .**  
(adaptado: I.S.R.M., 1978).

Para a determinação do coeficiente de Poisson é calculado pela razão entre as deformações laterais e as longitudinais.

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \right|$$

**Equação 24 – Coeficiente de Poisson, (I.S.R.M., 1978).**

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)}$$

**Equação 25 – Módulo de elasticidade transversal, (I.S.R.M., 1978).**

A instrumentação dos provetes ensaiados foi executada segundo o referido por Boguka *et al*, (1998).

Para o ensaio de resistência à compressão simples com extensometria, foi seleccionado um corpo de prova por cada grupo de provetes existente, ou seja, 15 como já tinha sido referido. Em cada um deles, foram preparadas duas faces opostas e paralelas ao esforço compressivo gerado pelos pratos da prensa, ficando um dos extensómetros em posição paralela aos esforços, medindo os encurtamentos sofridos pela face, e o outro perpendicular aos esforços, medindo as extensões. Com esta configuração de extensómetros é possível determinar a extensão longitudinal média, ( $\varepsilon_L$ ), e a extensão transversal média, ( $\varepsilon_T$ ).

A instrumentação com extensometria eléctrica de corpos de prova de granito, requer a aprendizagem de algumas técnicas de forma a garantir bons resultados durante o ensaio de compressão uniaxial.

O procedimento de instrumentação desenvolveu-se nas seguintes fases:

- Escolha dos extensómetros

No caso dos provetes de granito, que possuem resposta diferenciada à tensão aplicada, deve-se escolher sempre que possível extensómetros com dimensão suficiente que envolva o maior número possível de elementos cristalinos, de tal modo que a deformação lida seja o mais representativa possível de toda a superfície em estudo.

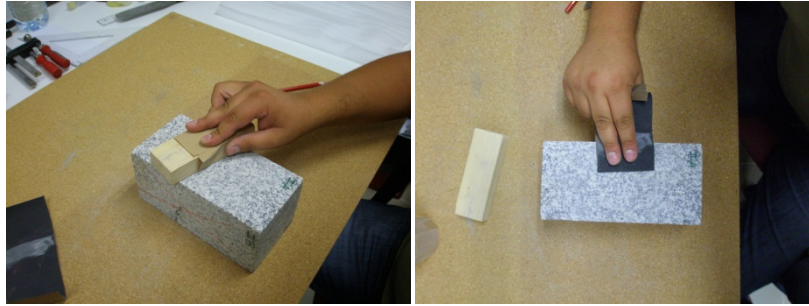
No presente estudo, foram utilizadas duas dimensões de extensómetros, nos provetes do grupo (A), (B), (C), (D), (E), (F), (G) e (R1), utilizaram-se extensómetros de referência PFLC-30-11, e do tipo resistivo de  $120 \pm 0.5$  Ohms, com 30 milímetros de comprimento do sensor, e 40 milímetros no total. Nos restantes grupos de provetes, foram utilizados extensómetros de referência PLC-60-11, e do tipo resistivo de  $120 \pm 0.5$  Ohms, com 60 milímetros de comprimento do sensor, e 75 milímetros no total.

- Preparação e instrumentação dos provetes

Após a realização dos restantes ensaios, seleccionaram-se os provetes a instrumentar, procedendo às verificações de paralelismos e medições de faces como já foi referido, começou então a primeira fase, que tem como objectivo preparar as superfícies para a instalação dos extensómetros.

Em primeiro lugar é necessário proceder à regularização da superfície do provete, de modo a retirar saliências que possam provocar o corte dos extensómetros numa fase inicial do ensaio, ou deformar a sua superfície, fornecendo leituras erradas. A superfície é polida, primeiro com uma lixa para metais de grão grosseiro, progredindo para valores mais finos Figura 33.

Após se obter uma superfície regular e uniforme da face do provete, esta deverá ser limpa dos resíduos da operação, assim como cuidadosamente desengordurada. Para tal utiliza-se um pouco de algodão embebido em álcool isopropílico, que se deixará evaporar à temperatura ambiente, sem uso de ar forçado, Figura 34.

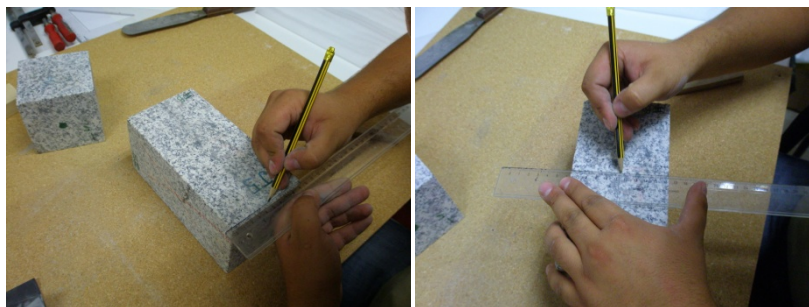


**Figura 33 – Procedimento de regularização da superfície do provete**



**Figura 34 – Procedimento de limpeza e desengorduramento da superfície do provete.**

Depois de completa a secagem da superfície, procede-se à marcação das linhas de referência para a colocação dos extensómetros, Figura 35.



**Figura 35 – Procedimento de marcação das linhas guia para colocação dos extensómetros.**

De seguida os extensómetros devem ser retirados dos invólucros onde são fornecidos e preparados para serem instalados. Para facilitar a colocação dos extensómetros sobre a superfície do provete, estes devem ser colocados sobre uma superfície de vidro ou lisa previamente desengordurada, com a face a ser colada volta para baixo de modo a que permaneçam completamente planos, Figura 36. Sobre eles é colocada um pouco de fita-cola de fraco poder adesivo. A colocação da fita-cola deve ser suficientemente energética para que os extensómetros fiquem perfeitamente planos, mas de forma a evitar excesso de tracção que force os extensómetros, Figura 36.

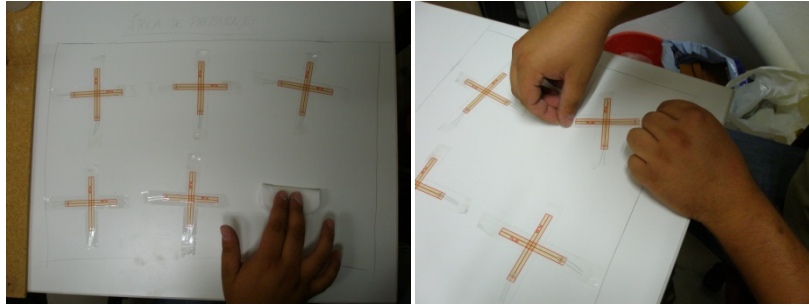


Figura 36 – Procedimento de preparação dos extensómetros.

Após a preparação dos extensómetros, procede-se à elaboração da cola, geralmente uma cola de dois componentes, tipo *epoxy*. Normalmente, estas colas possuem um tempo de utilização de extremamente curto, pelo que as operações seguintes deverão ser expeditas. A aplicação da cola deve ser rápida e precisa na espessura mínima para garantir a colagem perfeita dos extensómetros, Figura 37.



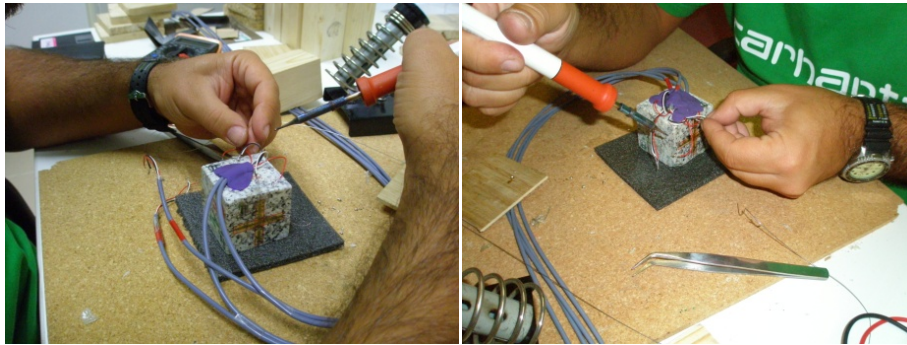
Figura 37 – Procedimento de aplicação da cola e colagem dos extensómetros.

Depois desta fase, os extensómetros devem ser pressionados contra a face do provete durante o tempo necessário para a cura da cola. A aplicação de sobrecargas de pressão deverá ser feita com cuidado para não danificar os filamentos nas superfícies dos extensómetros. No entanto, podem-se utilizar pequenos fragmentos de *neoprene* aplicados sobre uma fita *teflon* para evitar eventual colagem. Na Figura 38, pode-se observar um exemplo do procedimento seguido na cura de um provete cilíndrico.



Figura 38 – Procedimento utilizado no processo de cura de um provete cilíndrico.

A fase seguinte, consiste na soldadura dos cabos condutores de sinal dos extensómetros. A operação deve ser realizada com um ferro de soldar de ponta suficientemente fina e de baixa temperatura. Após a estanhagem dos fios condutores e do corte da extremidade estanhada ao mínimo, para a sua correcta fixação aos extensómetros, seguindo-se então a estanhagem dos seus pontos de soldadura, Figura 39.



**Figura 39 – Procedimento de soldadura dos cabos condutores aos extensómetros.**

Na Figura 40, podemos observar dois provetes instrumentados com extensómetros, preparados para serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão uniaxial.



**Figura 40 – Provetes instrumentados com extensómetros, prontos para serem submetidos a ensaio**

## 4. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Após a descrição da metodologia utilizada nos diversos ensaios, apresenta-se neste capítulo os resultados dos ensaios laboratoriais realizados.

Devido à diversidade de grupos de provetes em análise, optou-se por colocar no presente capítulo, um resumo dos resultados obtidos, assim estes serão apresentados por grupos de provetes, de forma, a oferecer uma consulta expedita na análise e visualização dos resultados

As tabelas que serão apresentadas, apenas têm a informação do valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão dos resultados obtidos por grupo de provetes. As tabelas de resultados gerais serão apresentadas em anexo, e sempre que se achar necessário serão referenciadas ao longo da apresentação dos resultados, por forma, a facilitar a consulta do presente estudo.

### 4.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (A)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 8, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (A). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo A	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	50	50	50			
<b>Valor Médio</b>				26.14	0.38	1.00
<b>Desvio Padrão</b>				0.13	0.13	0.33
<b>Valor Máximo</b>				26.32	0.58	1.52
<b>Valor Mínimo</b>				25.92	0.13	0.35

**Tabela 8 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.**

Na Tabela 9, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II)

Provetes Grupo A	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	v <sub>d</sub>	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
Valor Médio	5241.1	4178.6	0.38	45.32	45.67
Desvio Padrão	73.8	118.6	0.12	11.58	2.51
Valor Máximo	5380.4	4375.0	0.58	63.72	50.07
Valor Mínimo	5131.6	4020.8	0.21	25.16	42.33

Tabela 9 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (A), observa-se na Tabela 10, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo A	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	25.00		
Valor Médio		433.2	173.3
Desvio Padrão		46.5	18.6
Valor Máximo		491.8	196.7
Valor Mínimo		363.5	145.4

Tabela 10 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (A), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (A), o tipo de rotura mais verificado é por corte, estando presente em 9 dos 10 corpos ensaiados, apenas um teve uma rotura por lascamento.

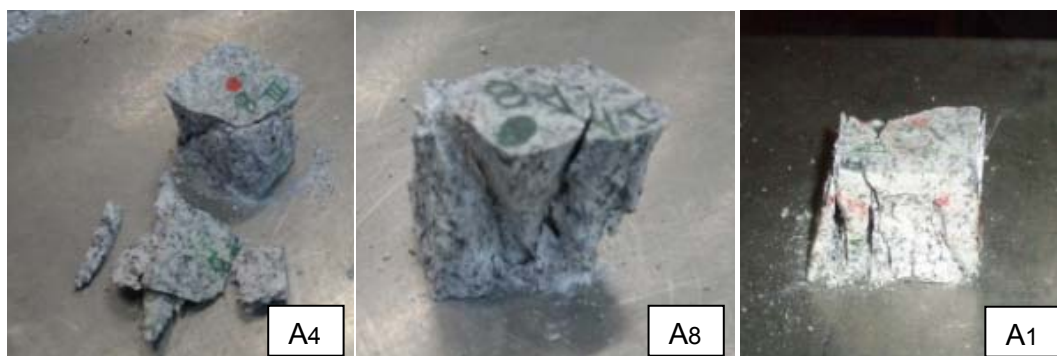


Figura 41 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (A). (A<sub>4</sub> e A<sub>8</sub> - tipo de rotura por corte; A<sub>1</sub> - tipo de rotura por lascamento).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (A1), na Figura 42, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

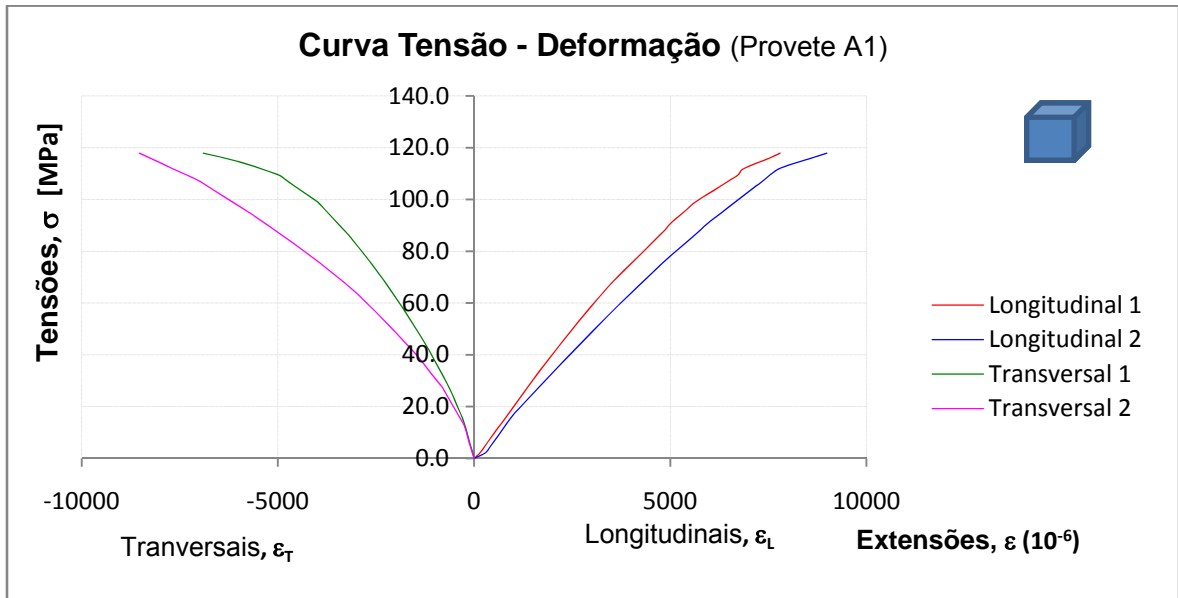


Figura 42 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (A1).

Para o provete (A1), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 17 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.57$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 6 \text{ GPa}$$

## 4.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (B)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 11, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (B). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo B	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	100	50	50			
<b>Valor Médio</b>				26.14	0.39	1.01
<b>Desvio Padrão</b>				0.21	0.04	0.10
<b>Valor Máximo</b>				26.64	0.43	1.13
<b>Valor Mínimo</b>				25.94	0.30	0.77

Tabela 11 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 12, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo B	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	FACES I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5147.4	4039.5	0.33	65.12	42.70
<b>Desvio Padrão</b>	148.9	109.0	0.20	11.08	2.38
<b>Valor Máximo</b>	5386.6	4213.7	0.64	83.54	46.27
<b>Valor Mínimo</b>	4909.9	3889.9	0.14	41.44	39.66

Tabela 12 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (B), observa-se na Tabela 13, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo B	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	25.00		
<b>Valor Médio</b>		376.7	150.7
<b>Desvio Padrão</b>		12.1	4.8
<b>Valor Máximo</b>		402.7	161.1
<b>Valor Mínimo</b>		362.4	145.0

Tabela 13 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (B), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (B), o tipo de rotura confinada encontra-se presente nos 11 corpos ensaiados.



Figura 43 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (B). (B<sub>1</sub>, B<sub>5</sub> e B<sub>7</sub> - tipo de rotura confinada).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (B9), na Figura 44, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

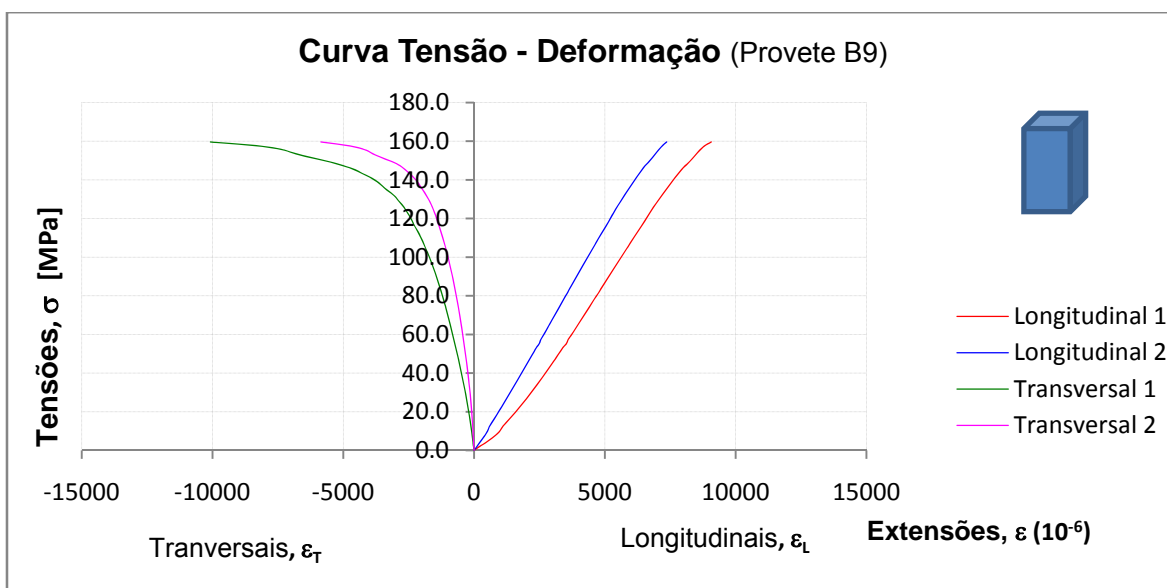


Figura 44 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (B9).

Para o provete (B9), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 19 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.22$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 8 \text{ GPa}$$

### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (C)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 14, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (C). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo C	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	125	50	50			
<b>Valor Médio</b>				26.07	0.39	0.83
<b>Desvio Padrão</b>				0.15	0.02	0.41
<b>Valor Máximo</b>				26.23	0.43	1.10
<b>Valor Mínimo</b>				25.88	0.36	0.05

Tabela 14 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 15, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo C	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	4882.4	3946.1	0.47	53.55	40.65
<b>Desvio Padrão</b>	191.3	88.7	0.17	8.28	1.95
<b>Valor Máximo</b>	5181.5	4035.4	0.62	63.38	42.71
<b>Valor Mínimo</b>	4508.9	3746.3	0.22	40.42	36.33

Tabela 15 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (C), observa-se na Tabela 16, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo C	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	25.00		
Valor Médio		258.8	103.5
Desvio Padrão		36.4	14.6
Valor Máximo		327.5	131.0
Valor Mínimo		211.9	84.7

Tabela 16 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (C), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (C), encontram-se presentes os três tipos de rotura, em que 5 dos corpos ensaiados tiveram o tipo de rotura por corte, 4 o tipo de rotura por lascamento e os restantes 2 verificaram o tipo de rotura confinada.

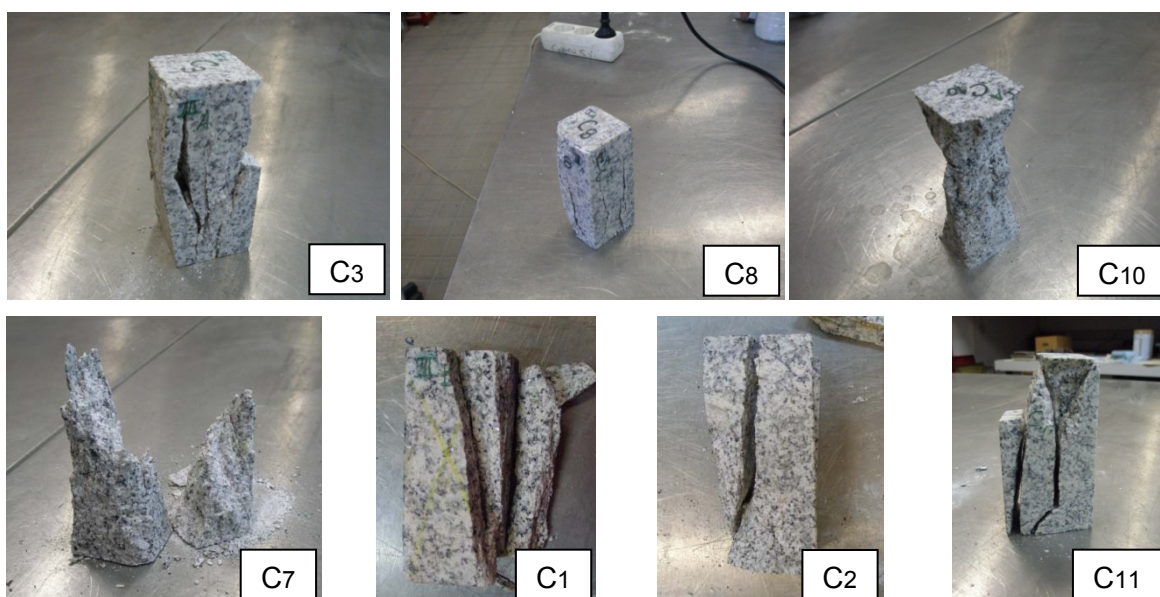


Figura 45 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (C). (C<sub>3</sub> e C<sub>8</sub> – tipo de rotura por lascamento; C<sub>10</sub> e C<sub>7</sub> – tipo de rotura confinada; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>11</sub> – tipo de rotura por corte).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (C4), na Figura 46, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (C4), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 40 \text{ GPa}$$

$$v = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.61$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + v)} = 12 \text{ GPa}$$

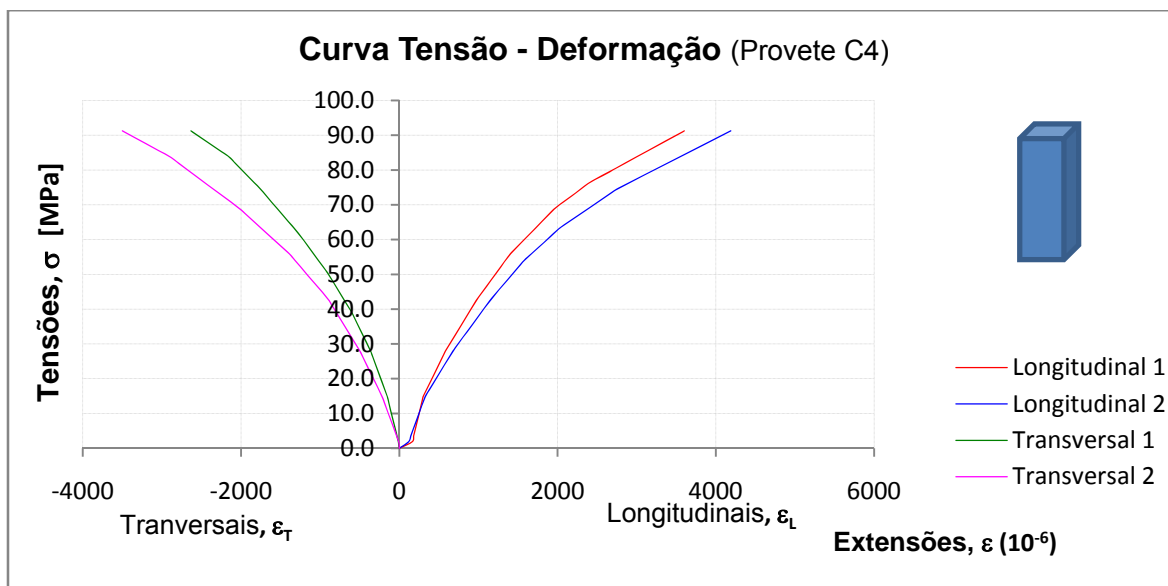


Figura 46 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (C4).

#### 4.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROJETES DO GRUPO (D)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 17, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (D). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo D	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	150	50	50			
<b>Valor Médio</b>				25.99	0.37	0.96
<b>Desvio Padrão</b>				0.29	0.02	0.05
<b>Valor Máximo</b>				26.24	0.39	1.02
<b>Valor Mínimo</b>				25.39	0.34	0.89

Tabela 17 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 18, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores

determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo D	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
Valor Médio	5058.5	3875.8	0.25	61.69	39.10
Desvio Padrão	147.9	181.4	0.21	7.05	3.48
Valor Máximo	5180.4	4227.5	0.62	69.90	45.38
Valor Mínimo	4839.2	3706.9	0.04	52.95	36.03

Tabela 18 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (D), observa-se na Tabela 19, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo D	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	25.00		
Média D		350.1	140.0
Desvio Padrão		22.9	9.2
Valor Máximo		374.2	149.7
Valor Mínimo		319.6	127.9

Tabela 19 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (D), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (D), ocorrem dois tipos de rotura, por corte e confinada, a primeira ocorreu em 6 provetes ensaiados, nos restantes 4 verificou-se a segunda.

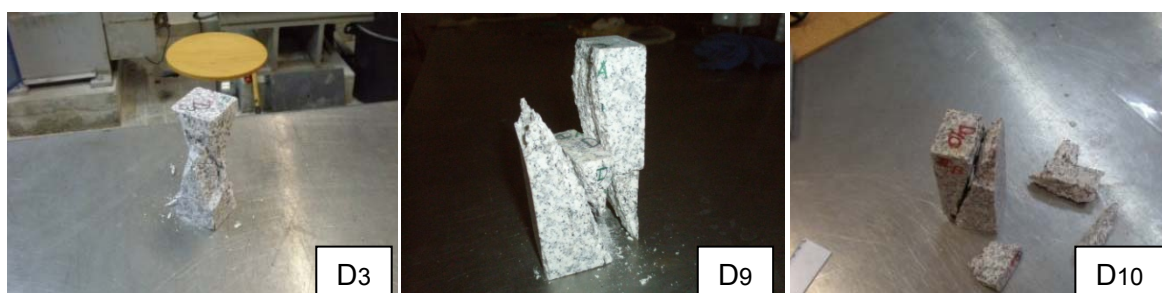


Figura 47 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (D). (D<sub>3</sub> – tipo de rotura confinada; D<sub>9</sub> e D<sub>10</sub> – tipo de rotura por corte).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (D4), na Figura 48, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

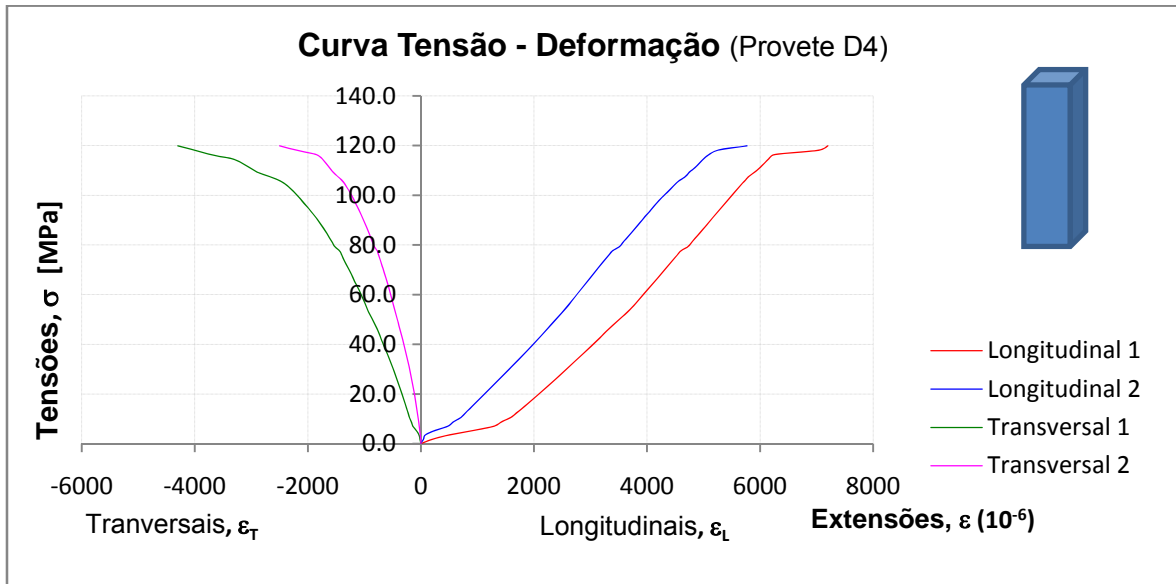


Figura 48 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (D4).

Através da curva tensão-deformação do provete (D4), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 16 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.22$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 7 \text{ GPa}$$

#### 4.5 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (E)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 20, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (E). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo E	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	70	70	70			
<b>Valor Médio</b>				26.23	0.33	0.87
<b>Desvio Padrão</b>				0.03	0.04	0.11
<b>Valor Máximo</b>				26.26	0.38	1.00
<b>Valor Mínimo</b>				26.19	0.27	0.72

Tabela 20 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 21, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo E	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5419.2	4454.6	0.55	55.70	52.10
<b>Desvio Padrão</b>	146.5	158.8	0.10	9.12	3.64
<b>Valor Máximo</b>	5561.0	4616.0	0.61	71.64	55.87
<b>Valor Mínimo</b>	5062.5	4193.8	0.35	41.54	46.14

Tabela 21 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (E), observa-se na Tabela 22, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo E	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	49.00		
<b>Valor Médio</b>		750.2	153.1
<b>Desvio Padrão</b>		97.0	19.8
<b>Valor Máximo</b>		885.5	180.7
<b>Valor Mínimo</b>		602.9	123.0

Tabela 22 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (E), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (E), ocorrem dois tipos de rotura, por corte e a confinada, sendo que a primeira ocorreu em 7 corpos de prova ensaiados, nos restantes 3 verificou-se o tipo de rotura confinada.

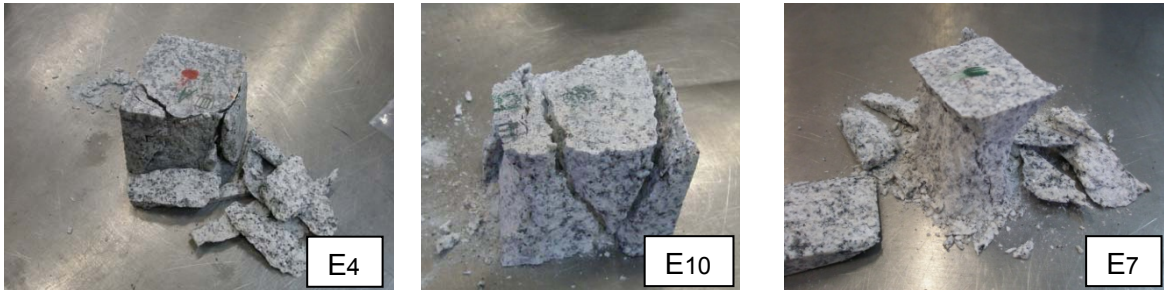


Figura 49 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (E). (E4, E10 – tipo de rotura por corte; E7 – tipo de rotura confinada.).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (E2), na Figura 50, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

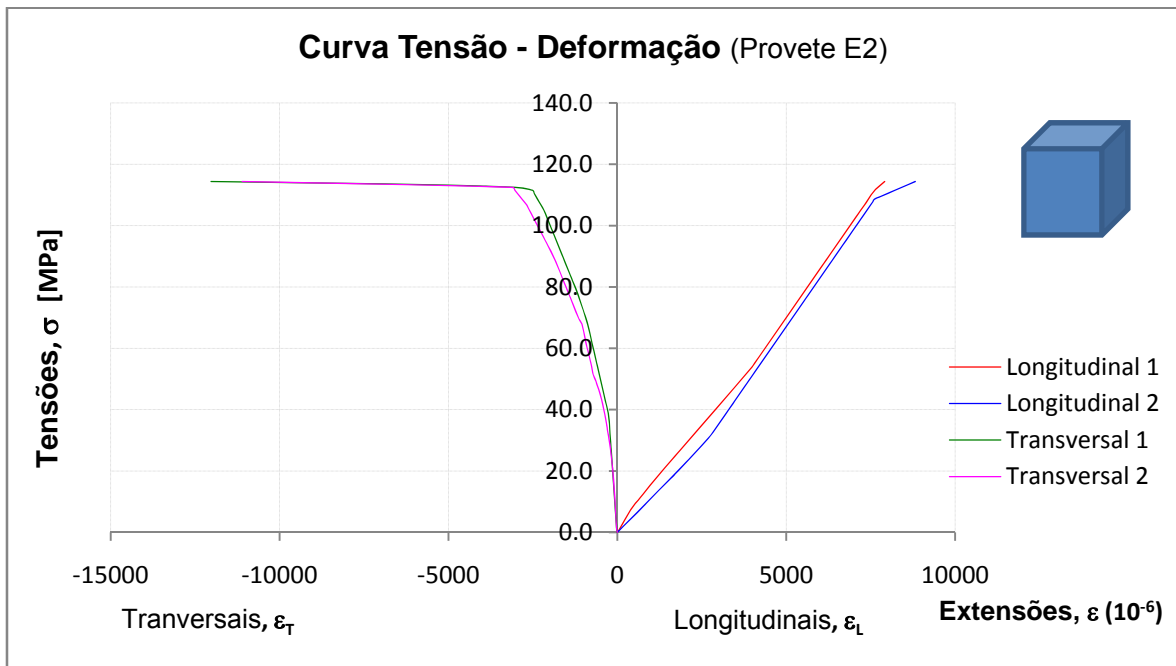


Figura 50 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (E2).

Através da curva tensão-deformação do provete (E2), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 14 \text{ GPa}$$

$$v = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.17$$

$$G = \frac{E_m}{2(1+v)} = 6 \text{ GPa}$$

#### 4.6 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROJETES DO GRUPO (F)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 23, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (F). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo F	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	140	70	70			
<b>Valor Médio</b>				26.02	0.38	0.99
<b>Desvio Padrão</b>				0.42	0.03	0.09
<b>Valor Máximo</b>				26.24	0.47	1.22
<b>Valor Mínimo</b>				24.85	0.36	0.94

Tabela 23 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 24, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo F	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5233.6	4236.4	0.46	51.20	46.75
<b>Desvio Padrão</b>	60.7	119.9	0.14	4.73	3.05
<b>Valor Máximo</b>	5308.9	4392.5	0.60	56.19	50.52
<b>Valor Mínimo</b>	5148.1	4088.2	0.30	42.56	41.55

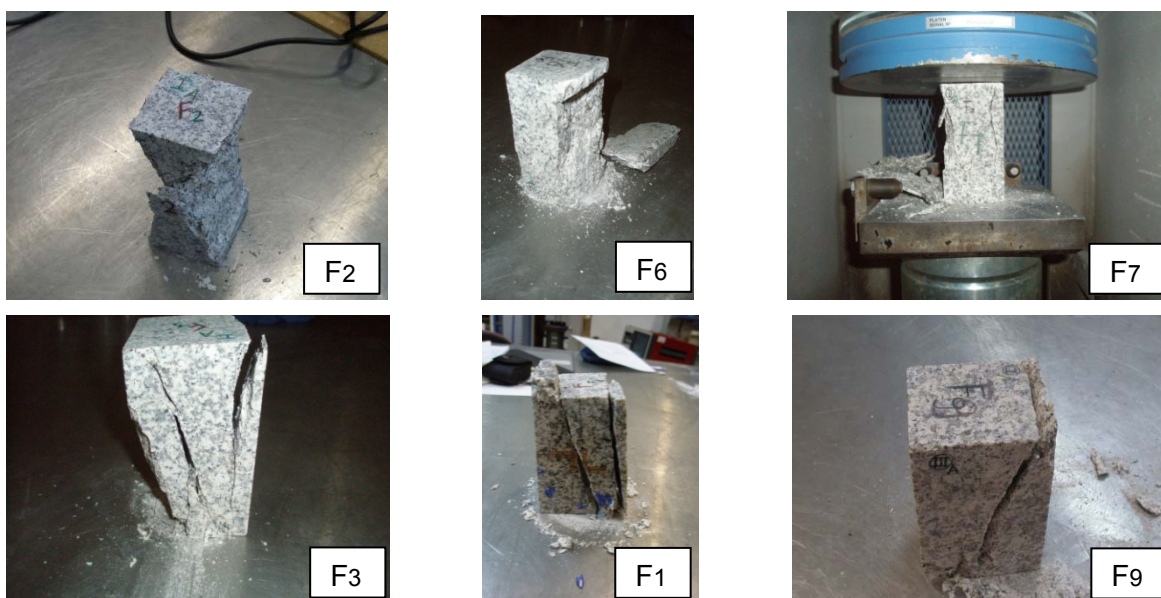
Tabela 24 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (F), observa-se na Tabela 25, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo F	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	49.00		
Valor Médio		472.9	96.5
Desvio Padrão		58.8	12.0
Valor Máximo		566.7	115.6
Valor Mínimo		399.8	81.6

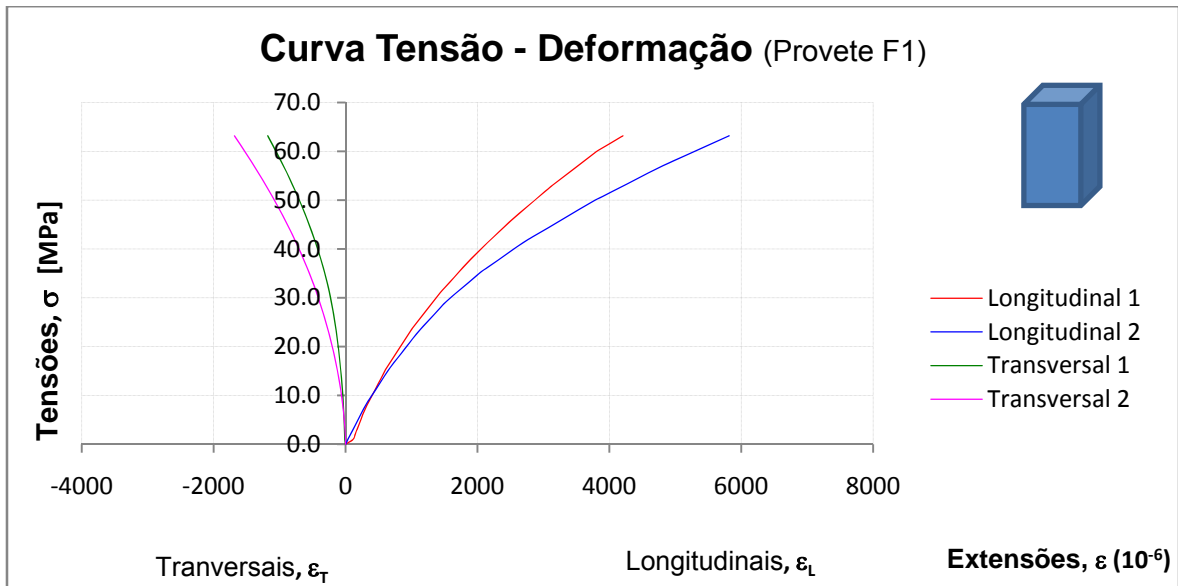
**Tabela 25 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (F), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.**

Nos corpos de prova do grupo (F), encontram-se presentes os três tipos de rotura, em que 7 dos corpos ensaiados obtiveram um tipo de rotura por corte, 2 tiveram um tipo de rotura por lascamento e apenas 1 verificou um tipo de rotura confinada.



**Figura 51 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (F). (F<sub>2</sub> – tipo de rotura confinada; F<sub>6</sub> e F<sub>7</sub> – tipo de rotura por lascamento; F<sub>3</sub>, F<sub>1</sub> e F<sub>9</sub> – tipo de rotura por corte).**

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (F1), na Figura 52, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.



**Figura 52 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (F1).**

Através da curva tensão-deformação do provete (F1), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 21 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.20$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 9 \text{ GPa}$$

#### **4.7 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (G)**

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 26, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (G). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo G	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	210	70	70			
<b>Valor Médio</b>				26.22	0.32	0.84
<b>Desvio Padrão</b>				0.02	0.04	0.10
<b>Valor Máximo</b>				26.25	0.40	1.05
<b>Valor Mínimo</b>				26.19	0.28	0.72

Tabela 26 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 27, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo G	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	4666.4	3825.7	0.55	58.91	38.40
<b>Desvio Padrão</b>	47.3	92.1	0.16	5.98	1.83
<b>Valor Máximo</b>	4751.7	3902.8	0.64	69.28	39.95
<b>Valor Mínimo</b>	4587.9	3645.8	0.24	49.50	34.84

Tabela 27 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (G), observa-se na Tabela 28, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo G	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	49.00		
<b>Valor Médio</b>		574.3	117.2
<b>Desvio Padrão</b>		54.2	11.1
<b>Valor Máximo</b>		641.6	130.9
<b>Valor Mínimo</b>		517.2	105.6

Tabela 28 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (G), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (G), encontram-se presentes os três tipos de rotura, em que 6 dos corpos de prova ensaiados obtiveram um tipo de rotura por corte, 3 tiveram um tipo de rotura confinada e apenas 1 verificou um tipo de rotura por lascamento.

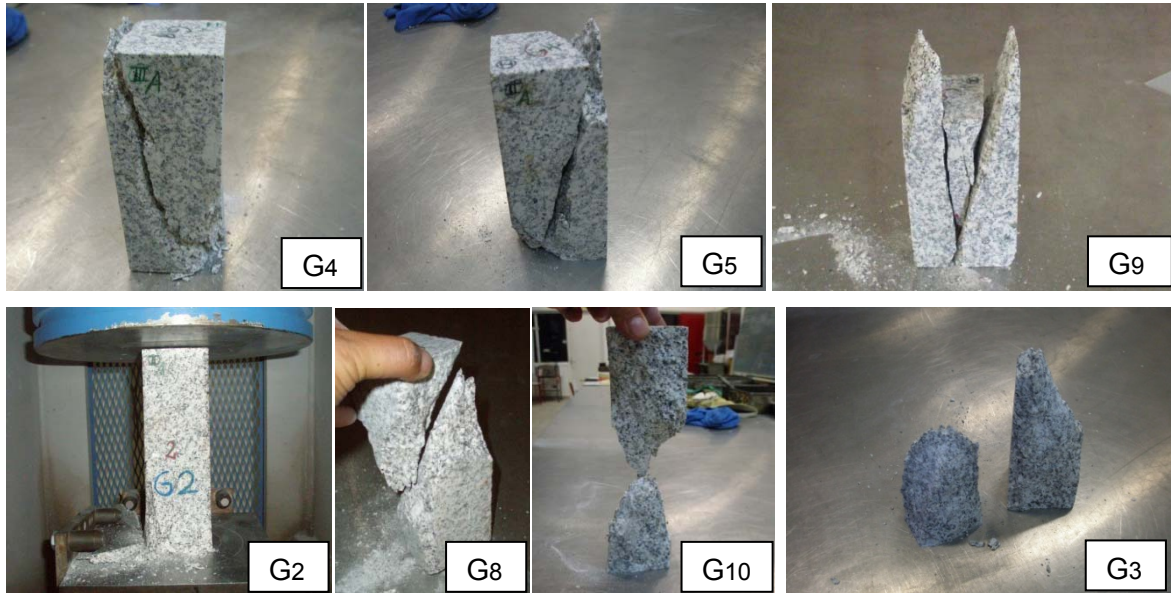


Figura 53 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (G). (G<sub>4</sub>, G<sub>5</sub> e G<sub>9</sub> – tipo de rotura por corte; G<sub>2</sub> – tipo de rotura por lascamento; G<sub>8</sub>, G<sub>10</sub> e G<sub>3</sub> – tipo de rotura confinada).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (G6), na Figura 54, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

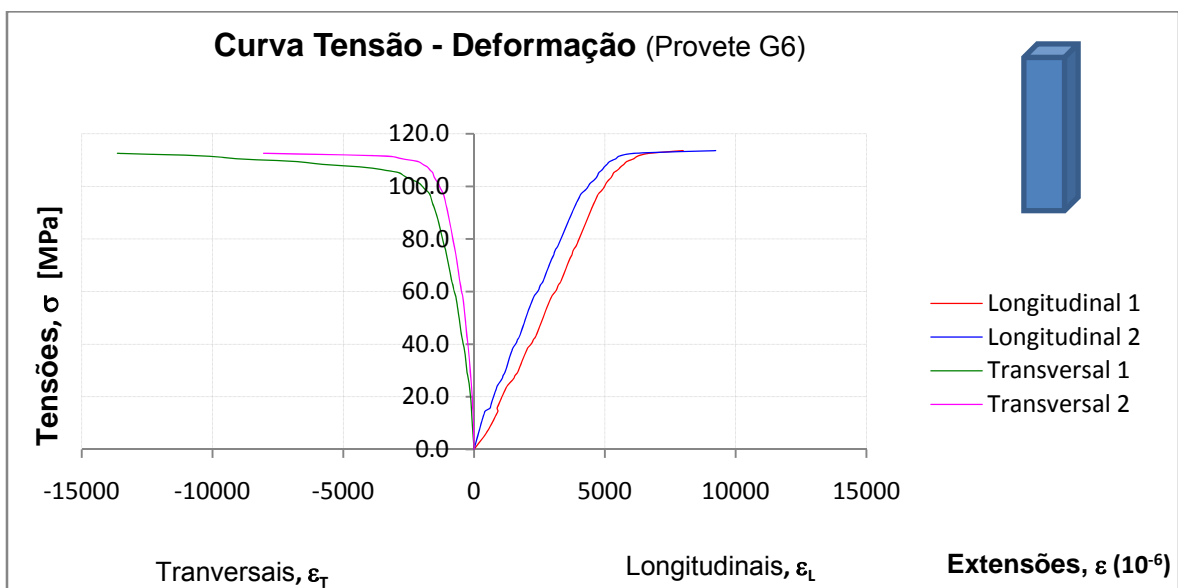


Figura 54 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (G6).

Através da curva tensão-deformação do provete (G6), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 21 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.17$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 9 \text{ GPa}$$

#### 4.8 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (H)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 29, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (H). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo H	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	100	100	100			
<b>Valor Médio</b>				26.18	0.40	1.04
<b>Desvio Padrão</b>				0.02	0.03	0.08
<b>Valor Máximo</b>				26.21	0.42	1.11
<b>Valor Mínimo</b>				26.15	0.33	0.86

Tabela 29 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 30, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo H	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)I				
	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [ m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5322.2	4120.4	0.25	60.09	44.61
<b>Desvio Padrão</b>	83.3	112.5	0.06	6.13	2.39
<b>Valor Máximo</b>	5497.2	4300.0	0.33	70.01	48.36
<b>Valor Mínimo</b>	5211.6	3921.6	0.12	50.73	40.28

Tabela 30 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (H), observa-se na Tabela 31, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo H	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	100.00		
<b>Valor Médio</b>		1598.8	159.9
<b>Desvio Padrão</b>		129.4	12.9
<b>Valor Máximo</b>		1842.8	184.3
<b>Valor Mínimo</b>		1457.3	145.7

Tabela 31 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (H), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (H), verificou-se em 7 dos 10 corpos de prova levados a ensaio, o tipo de rotura por corte, nos restantes a rotura foi do tipo confinada.



Figura 55 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (H). (H1, H5 e H2 – Tipo de rotura por corte)

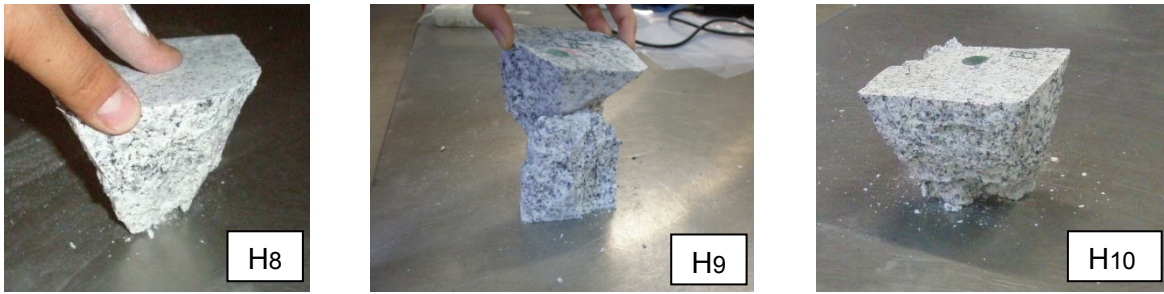


Figura 56 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (H). (H<sub>8</sub>, H<sub>9</sub> e H<sub>10</sub> – Rotura confinada)

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (H7), na Figura 57, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

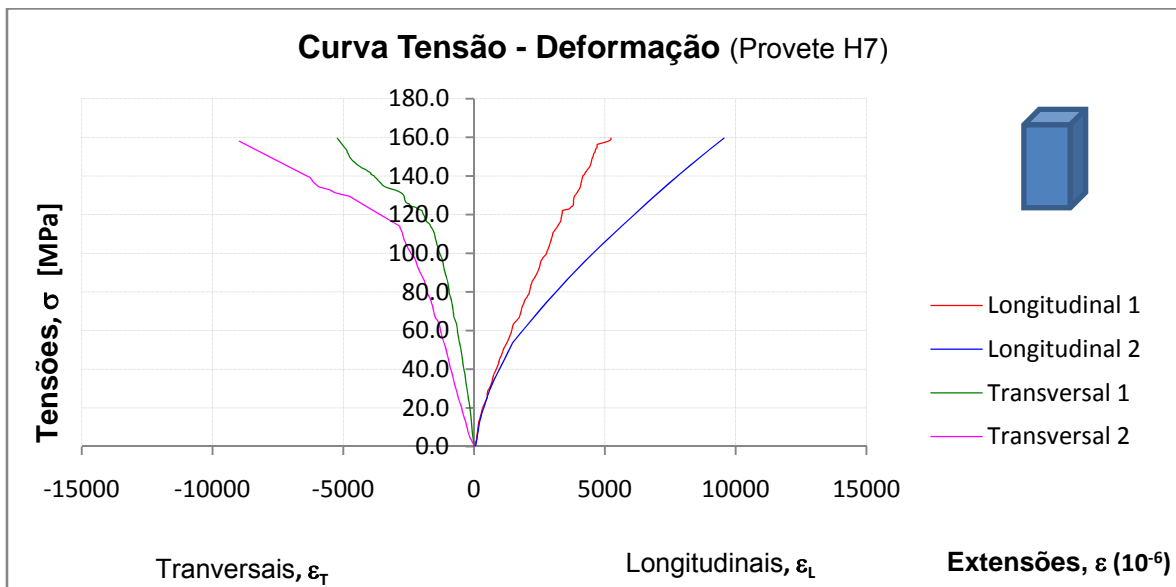


Figura 57 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (H7).

Através da curva tensão-deformação do provete (H7), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 47 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.7$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 14 \text{ GPa}$$

#### 4.9 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (I)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 32, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (I). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo I	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	150	100	100			
<b>Valor Médio</b>				26.20	0.36	0.95
<b>Desvio Padrão</b>				0.01	0.03	0.07
<b>Valor Máximo</b>				26.23	0.41	1.08
<b>Valor Mínimo</b>				26.18	0.33	0.87

Tabela 32 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 33, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo I	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5293.6	4199.2	0.37	59.52	46.28
<b>Desvio Padrão</b>	139.1	184.4	0.17	6.86	4.09
<b>Valor Máximo</b>	5483.6	4553.0	0.61	71.39	54.32
<b>Valor Mínimo</b>	5087.8	3982.7	0.23	46.41	41.58

Tabela 33 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (I), observa-se na Tabela 33, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo I	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	100.00		
Valor Médio		1397.1	139.7
Desvio Padrão		155.7	15.6
Valor Máximo		1727.2	172.7
Valor Mínimo		1253.1	125.3

Tabela 34 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (I), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (I), verificou-se em 6 dos 10 corpos de prova o tipo de rotura por corte, nos restantes ocorreu a rotura do tipo confinada.

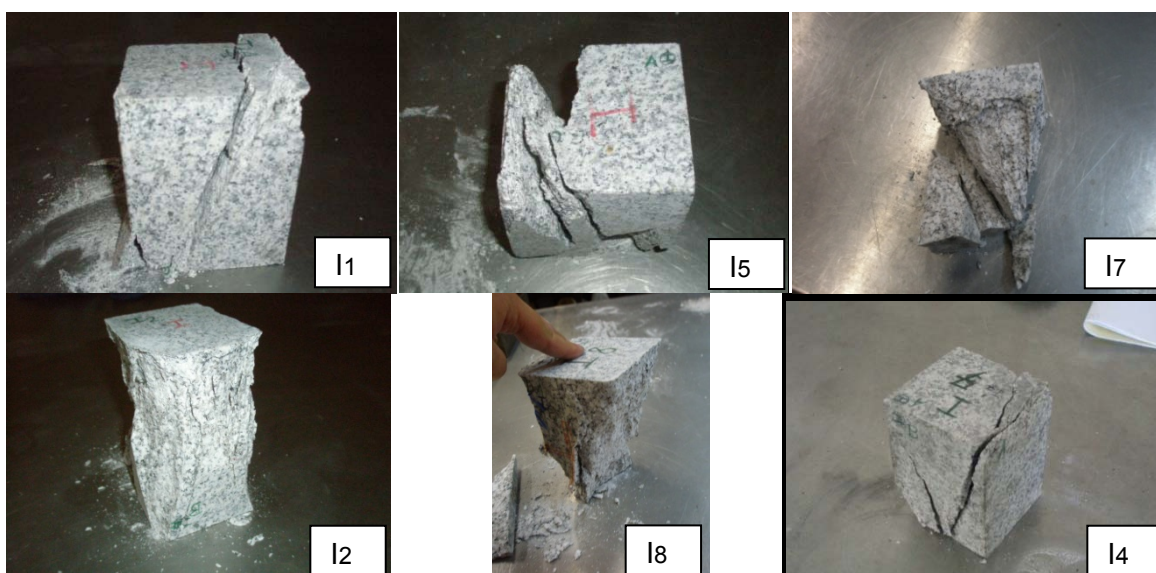


Figura 58 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova grupo (I), (I<sub>1</sub>, I<sub>5</sub>, I<sub>7</sub> e I<sub>4</sub> – Tipo de rotura por corte; I<sub>2</sub>, I<sub>8</sub> – Rotura confinada)

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (I8), na Figura 59, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (I8), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 27 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.20$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 11 \text{ GPa}$$

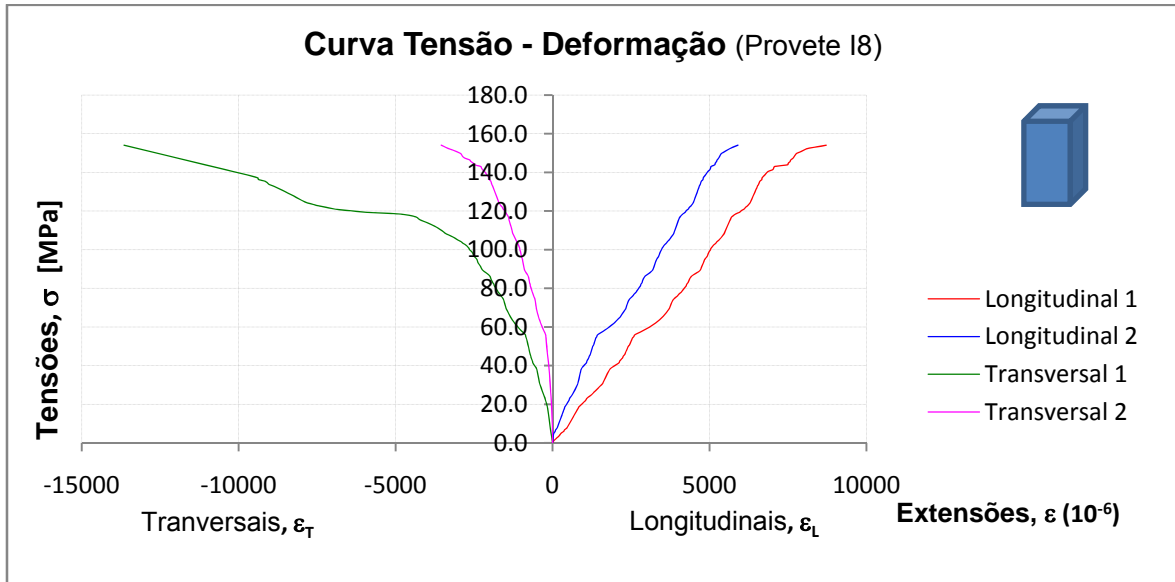


Figura 59 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (I8).

#### 4.10 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROJETES DO GRUPO (J)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 35, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (J). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo J	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
	200	100	100			
<b>Valor Médio</b>				26.20	0.41	0.74
<b>Desvio Padrão</b>				0.05	0.02	0.39
<b>Valor Máximo</b>				26.34	0.43	1.10
<b>Valor Mínimo</b>				26.15	0.35	0.06

Tabela 35 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 36, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores

determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo J	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	5124.8	3957.9	0.25	55.87	41.05
<b>Desvio Padrão</b>	136.0	59.3	0.09	12.69	1.27
<b>Valor Máximo</b>	5290.2	4076.4	0.39	69.95	43.55
<b>Valor Mínimo</b>	4840.7	3870.3	0.14	30.95	39.21

Tabela 36 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (J), observa-se na Tabela 37, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo J	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	100.00		
<b>Média J</b>		1471.0	147.1
<b>Desvio Padrão</b>		73.7	7.4
<b>Valor Máximo</b>		1603.0	160.3
<b>Valor Mínimo</b>		1389.0	138.9

Tabela 37 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (J), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (J), verificou-se em 7 dos 10 corpos de prova a rotura por corte, nos restantes 3 esteve presente a rotura confinada. (Figura 60)

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (J5), na Figura 61, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

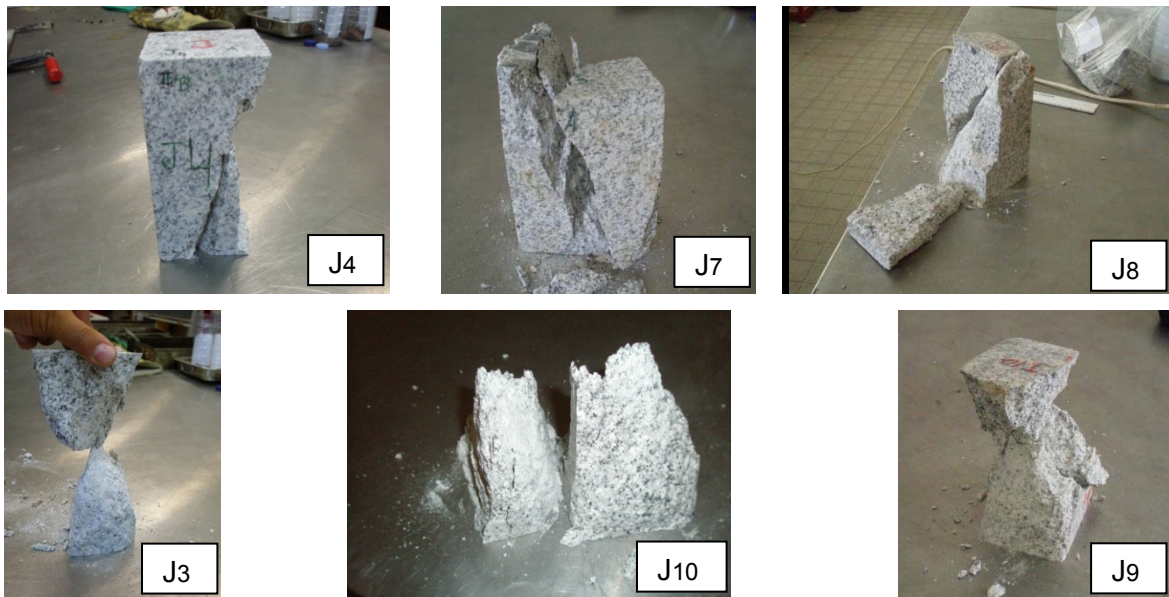


Figura 60 – Tipos de rotura verificados nos corpos de prova do grupo (J). (J4, J7 e J8 – tipo de rotura por corte; J3, J9 e J10 – rotura confinada).

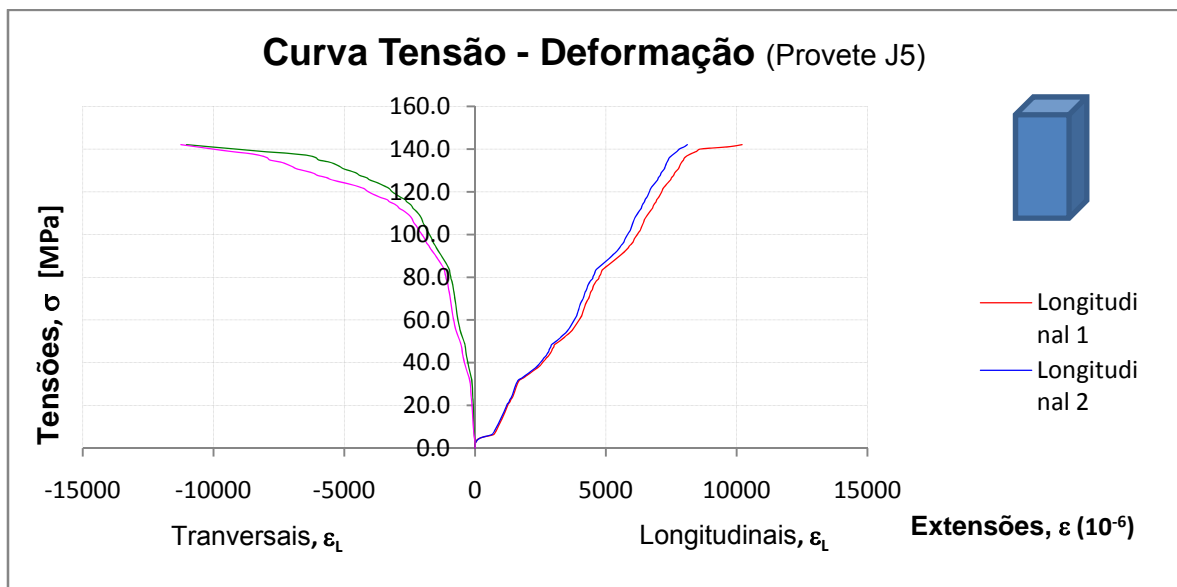


Figura 61 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (J5).

Através da curva tensão-deformação do provete (J5), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 17 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.2$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 7 \text{ GPa}$$

#### 4.11 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (R1)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 38, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (R1). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo R1	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
	63	63			
<b>Valor Médio</b>			26.33	0.15	0.40
<b>Desvio Padrão</b>			0.03	0.01	0.03
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.17	0.44
<b>Valor Mínimo</b>			26.30	0.14	0.37

Tabela 38 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 39, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo R1	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	$\nu_d$	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	4727.7	2730.0	0.25	49.12	19.66
<b>Desvio Padrão</b>	194.8	115.4	0.01	4.01	1.64
<b>Valor Máximo</b>	4959.3	2824.1	0.26	53.00	21.03
<b>Valor Mínimo</b>	4418.6	2533.3	0.23	42.37	16.88

Tabela 39 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (R1), observa-se na Tabela 40, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo R1	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	31.17		
Valor Médio		385.1	123.5
Desvio Padrão		30.5	9.8
Valor Máximo		439.5	141.0
Valor Mínimo		369.4	118.5

Tabela 40 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (R1), ocorreu o tipo de rotura por lascamento nos 5 corpos de prova ensaiados.

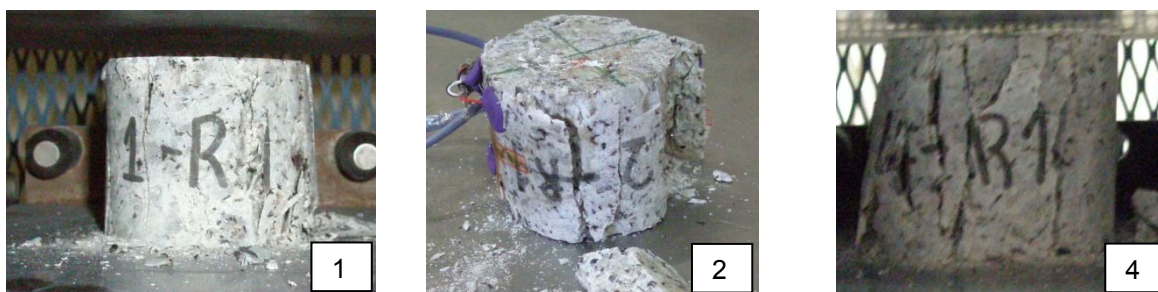


Figura 62 – Tipo de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R1), (1, 2 e 3 - rotura por lascamento).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (2R1), na Figura 63, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (2R1), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 10 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.45$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 4 \text{ GPa}$$

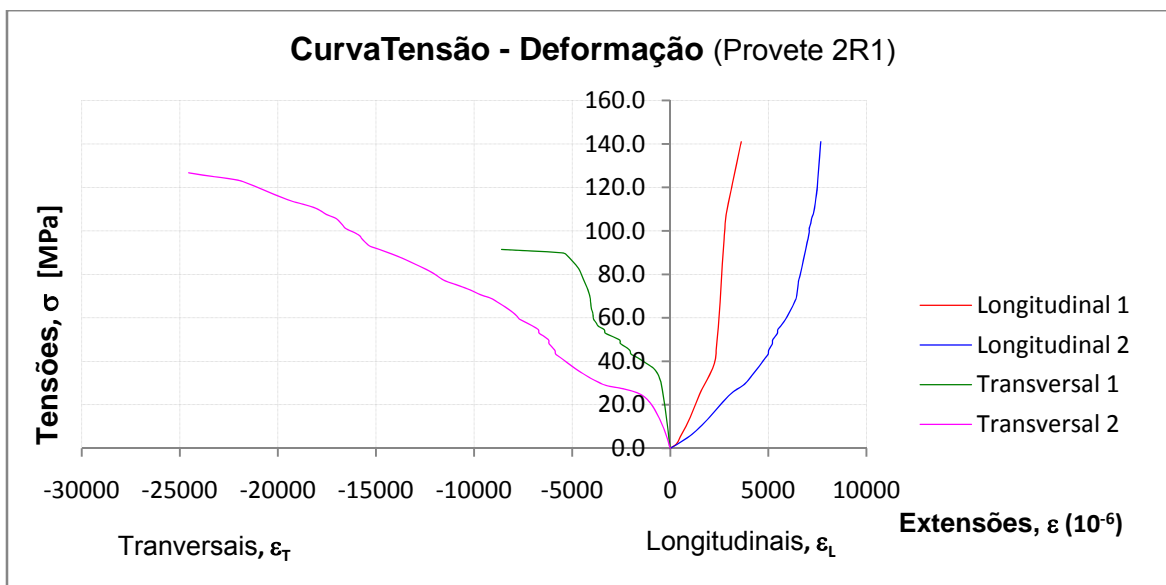


Figura 63 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (2R1).

#### 4.12 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (R1.5)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 41, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (R1.5). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo R1.5	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
	95	63			
<b>Valor Médio</b>			26.36	0.14	0.37
<b>Desvio Padrão</b>			0.01	0.01	0.03
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.16	0.42
<b>Valor Mínimo</b>			26.35	0.13	0.34

Tabela 41 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 42, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo R1.5	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	V <sub>P</sub> [m/s]	V <sub>S</sub> [m/s]	v <sub>d</sub>	E <sub>d</sub> [Gpa]	G <sub>d</sub> [Gpa]
Valor Médio	3858.0	2883.6	0.18	32.62	17.22
Desvio Padrão	116.5	274.0	0.09	17.61	9.07
Valor Máximo	4032.9	3121.0	0.25	35.97	25.69
Valor Mínimo	3705.2	2409.3	0.13	33.49	15.31

Tabela 42 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (R1.5), observa-se na Tabela 43, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes do grupo R1.5	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	31.17		
Valor Médio		241.2	77.4
Desvio Padrão		18.3	5.9
Valor Máximo		261.3	83.8
Valor Mínimo		219.2	70.3

Tabela 43 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R1.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (R1.5), ocorreu o tipo de rotura por corte nos 5 provetes ensaiados.



Figura 64 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R1.5), (1, 4 e 5 - rotura por corte).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (3R1.5), na Figura 65, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (3R1.5), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 25 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.14$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 11 \text{ GPa}$$

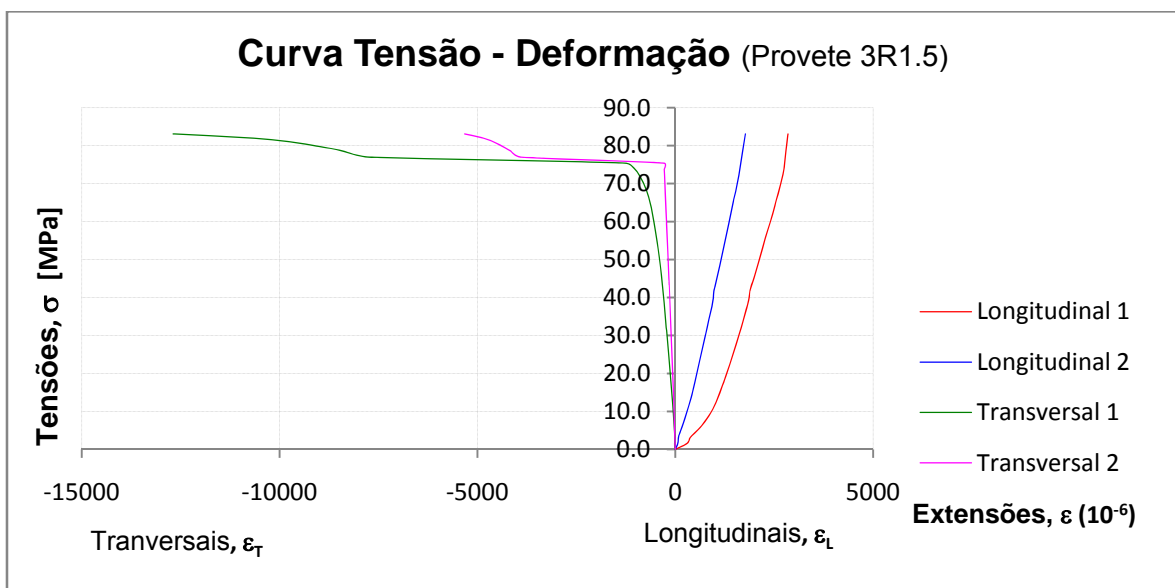


Figura 65 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R1.5).

#### 4.13 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (R2)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 44, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (R2). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo R2	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
	126	63			
<b>Valor Médio</b>			26.34	0.15	0.38
<b>Desvio Padrão</b>			0.02	0.02	0.05
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.17	0.45
<b>Valor Mínimo</b>			26.32	0.13	0.33

Tabela 44 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 45, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo R2	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	2846.8	2279.9	0.32	16.46	14.13
<b>Desvio Padrão</b>	44.4	50.6	0.14	13.05	6.50
<b>Valor Máximo</b>	2907.2	2332.1	0.48	15.83	14.34
<b>Valor Mínimo</b>	2793.8	2204.6	0.29	2.22	12.81

Tabela 45 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (R2), observa-se na Tabela 46, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo R2	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	31.17		
<b>Valor Médio</b>		256.9	82.4
<b>Desvio Padrão</b>		19.5	6.3
<b>Valor Máximo</b>		290.1	93.1
<b>Valor Mínimo</b>		239.4	76.8

Tabela 46 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (R2), ocorreu o tipo de rotura por corte em 4 dos 5 provetes ensaiados, a rotura por lascamento apenas esteve presente num deles.

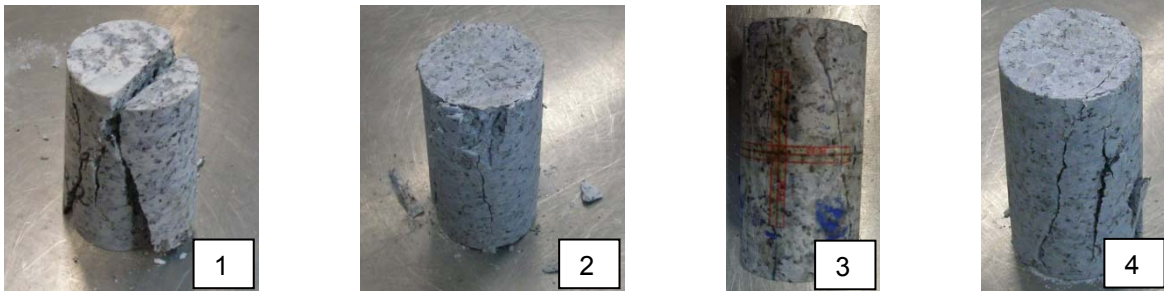


Figura 66 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R2), (1, 2 e 4 – rotura por corte; 2 – rotura por lascamento).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (3R2), na Figura 67, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (3R2), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 14 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.12$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 6 \text{ GPa}$$

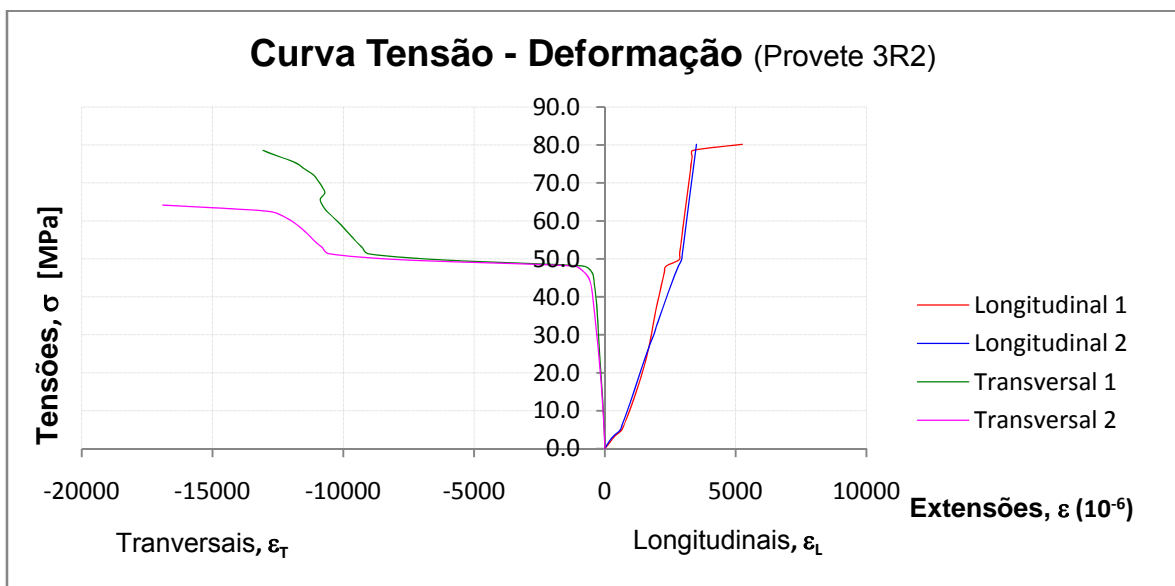


Figura 67 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R2).

#### 4.14 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (R2.5)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 47, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (R2.5). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo R2.5	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
	158	63			
<b>Valor Médio</b>			26.37	0.21	0.57
<b>Desvio Padrão</b>			0.03	0.01	0.04
<b>Valor Máximo</b>			26.40	0.23	0.61
<b>Valor Mínimo</b>			26.33	0.20	0.53

Tabela 47 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 48, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo R2.5	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
<b>Valor Médio</b>	4216.5	3268.7	0.32	20.52	17.51
<b>Desvio Padrão</b>	49.5	50.9	0.11	16.49	10.12
<b>Valor Máximo</b>	4276.3	3336.8	0.28	39.91	29.33
<b>Valor Mínimo</b>	4160.0	3223.1	0.23	37.83	27.36

Tabela 48 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (R2.5), observa-se na Tabela 49, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo R2.5	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo
	31.17		
Valor Médio		273.8	87.8
Desvio Padrão		21.2	6.8
Valor Máximo		295.6	94.8
Valor Mínimo		251.5	80.7

Tabela 49 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R2.5), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (R2.5), ocorreu o tipo de rotura por corte em todos provetes ensaiados.

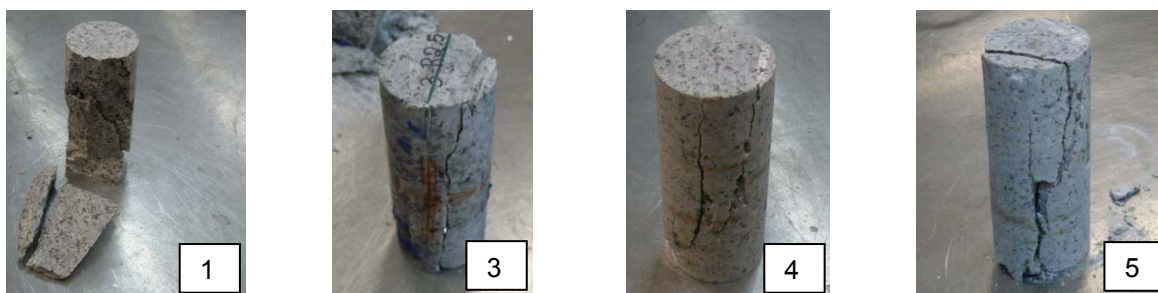


Figura 68 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R2.5), (1, 3, 4 e 5 – rotura por corte).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (3R2.5), na Figura 69, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

Através da curva tensão-deformação do provete (3R2.5), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_L} = 19 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = 0.34$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 7 \text{ GPa}$$

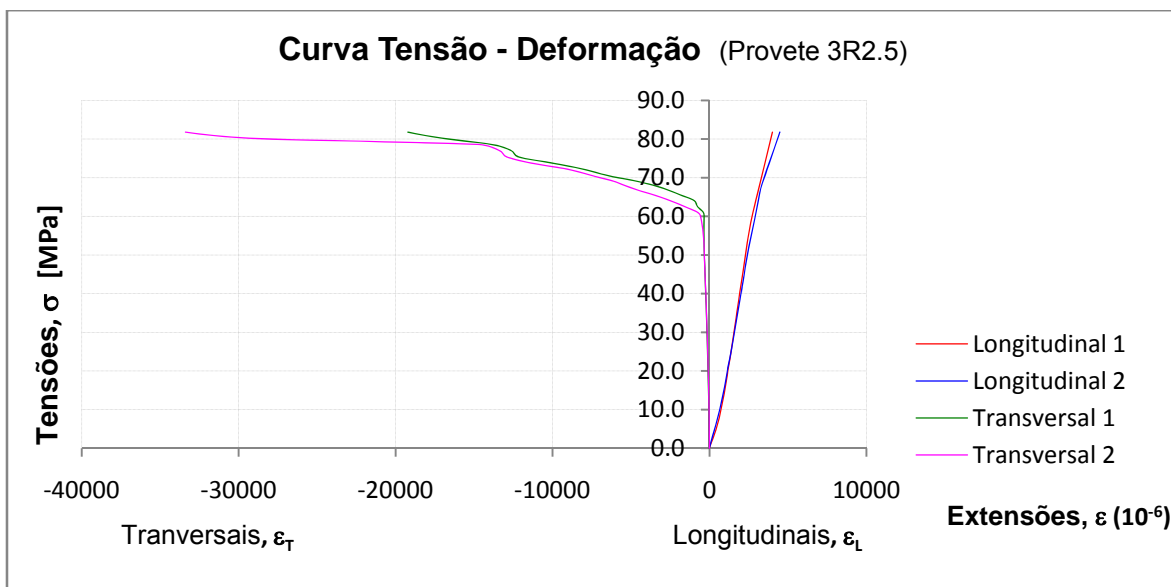


Figura 69 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (3R2.5).

#### 4.15 RESULTADOS OBTIDOS NOS PROVETES DO GRUPO (R3)

Após a realização dos ensaios de caracterização física, apresenta-se na Tabela 50, o valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, referentes à densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, obtidas em laboratório para os provetes do grupo (R3). Para uma observação completa dos resultados consultar o Anexo I.

Provetes Grupo R3	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
	189	63			
<b>Valor Médio</b>			26.34	0.21	0.55
<b>Desvio Padrão</b>			0.04	0.04	0.11
<b>Valor Máximo</b>			26.39	0.26	0.68
<b>Valor Mínimo</b>			26.29	0.14	0.37

Tabela 50 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão da densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Na Tabela 51, encontra-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes ao ensaio de velocidade de propagação das ondas P e S, assim como, os valores determinados para o coeficiente de Poisson dinâmico, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos. (Tabela completa, ver Anexo II).

Provetes Grupo R3	Provetes Secos - ONDAS P e S (Pundit P+S)				
	Fases I – I (Topo - Base)				
	$V_P$ [m/s]	$V_S$ [m/s]	$\nu_d$	$E_d$ [Gpa]	$G_d$ [Gpa]
Valor Médio	3474.6	2756.2	0.33	27.98	18.50
Desvio Padrão	170.0	31.1	0.19	14.58	8.17
Valor Máximo	3686.8	2786.8	0.68	53.04	20.50
Valor Mínimo	3284.0	2707.1	0.15	17.48	19.32

Tabela 51 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da velocidade de propagação das ondas P e S, coeficiente de Poisson dinâmico e módulo de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos.

Relativamente, ao ensaio de compressão uniaxial simples efectuado aos provetes do grupo (R3), observa-se na Tabela 52, o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão, referentes à força máxima aplicada e resistência à compressão simples. No Anexo III, estão disponíveis as tabelas com os valores para os provetes.

Provetes Grupo R3	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$F_c$ máx [kN]	$\sigma_c$ [MPa] cálculo
	31.17		
Valor Médio		289.4	92.8
Desvio Padrão		39.6	12.7
Valor Máximo		336.7	108.0
Valor Mínimo		242.8	77.9

Tabela 52 – Resultados obtidos nos provetes do grupo (R3), relativo ao valor médio, máximo, mínimo e respectivo desvio padrão, da força máxima de compressão aplicada e resistência à compressão simples.

Nos corpos de prova do grupo (R3), ocorreu o tipo de rotura por corte em todos provetes ensaiados.

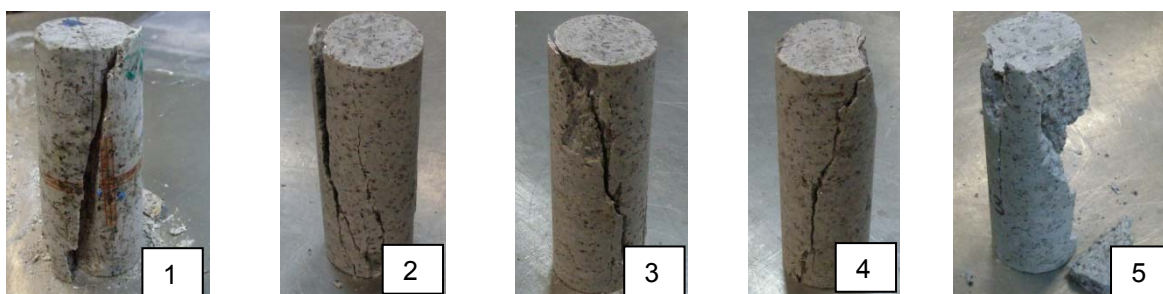


Figura 70 – Tipos de rotura presente nos corpos de prova do grupo (R3), (1, 2, 3, 4 e 5 – rotura por corte).

Em relação, ao ensaio de resistência à compressão uniaxial com extensometria, foi instrumentado o provete (1R3), na Figura 71, podemos observar a curva tensão-deformação do respectivo ensaio.

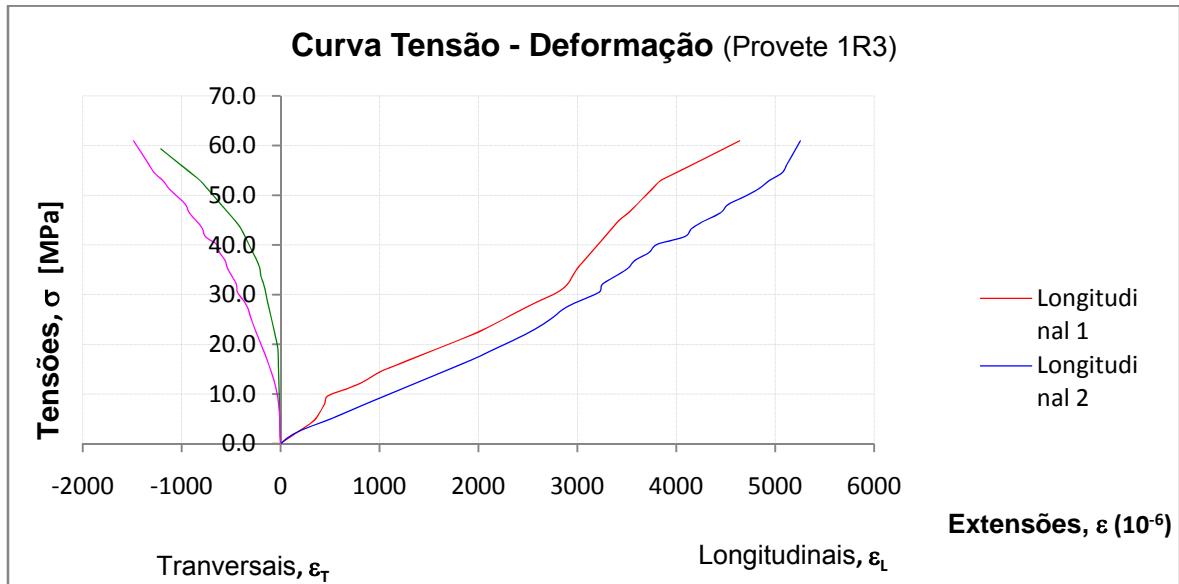


Figura 71 – Curva tensão-deformação obtida para o provete (1R3).

Através da curva tensão-deformação do provete (1R3), foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos:

$$E_m = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_L} = 11 \text{ GPa}$$

$$\nu = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} = 0.12$$

$$G = \frac{E_m}{2(1 + \nu)} = 7 \text{ GPa}$$

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na introdução foi referido que neste último capítulo seriam salientadas as conclusões mais relevantes, assim, após a realização dos ensaios e com base nos resultados, tratados e apresentados no capítulo anterior, podemos tecer as seguintes considerações finais.

No que diz respeito, aos parâmetros físicos em estudo, os provetes de granito provenientes da amostragem 1, apresentam valores de densidade aparente na ordem dos 26,1 kN/m<sup>3</sup>, porosidade aberta de 1% e absorção de água de 0.4%, logo estamos na presença de um granito são. O ensaio de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas também vai de encontro a um granito são, pois os valores da velocidade das ondas P variam entre os 4500 m/s a 5500 m/s, e a velocidade das ondas S variam entre os 3600 m/s a 4600 m/s.

É importante referir, que no ensaio de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas foi feito em todos os provetes para os estados, seco e saturado, verificando-se sempre que a velocidade de propagação nos provetes no estado saturado é sempre superior, pois, no estado saturado os poros do provete são preenchidos pela água.

Em relação aos provetes de granito provenientes da amostragem 2, apresentam valores de densidade aparente na ordem dos 26.3 kN/m<sup>3</sup>, porosidade aberta de 0.5% e absorção de água 0.2%, logo estamos na presença de um granito são, em relação à velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, as ondas P variam entre os 3000 m/s e os 4700 m/s, e as ondas S variam entre os 2200 m/s e os 3300 m/s.

Como podemos constatar, todos os grupos de provetes apresentam propriedades físicas muito similares, no entanto quando são submetidos ao ensaio de compressão uniaxial, apresentam valores bastante diferentes, tal facto deve-se ao denominado “efeito de escala” (dimensões diferentes), existente entre os provetes em análise.

Em relação, ao efeito de escala, é notório que influencia directamente a variação da resistência à compressão uniaxial, de forma a entender melhor este efeito, apresentam-se os seguintes itens:

- Os provetes do grupo (A), têm em média uma resistência à compressão uniaxial de 173 MPa, já os provetes do grupo (B) apresentam um valor de 150 MPa, ou

seja neste caso o aumento da altura (5 centímetros para 10), originou uma perda de resistência à compressão uniaxial na ordem dos 23 MPa.

- Se fizermos uma análise idêntica à anterior, para os provetes do grupo (A), em relação aos do grupo (C), o aumento de altura (5 centímetros para 12.5), origina uma perda de resistência à compressão uniaxial de 70 MPa.
- Nos provetes da amostragem 2, também se verifica o mesmo efeito, para provetes de relação  $(L/D) = 1$ , temos uma resistência à compressão uniaxial de 123 MPa, já os provetes de relação  $(L/D) = 1.5$  apresentam uma resistência de 77 MPa, neste caso a perda de resistência é na ordem dos 30 MPa.
- Fazendo uma relação aos provetes cúbicos, ou seja, aos provetes dos grupos (A, E e H), com aumento de aresta de 5 centímetros para 7, verifica-se uma perda de resistência na ordem dos 20 MPa, já em relação ao aumento de aresta de 7 centímetros para 10, verifica-se que o valor da resistência tende a estabilizar.

É importante referir, os provetes que apresentam menores desvios médios em relação à resistência à compressão uniaxial, são os de relação  $(L/D) = 2$ , deste modo verifica-se, que esta relação é aquela que melhor pode servir para caracterizar o tipo de material em análise.

Em relação a trabalhos futuros, seria interessante o estudo de provetes com esbeltez superior a 3, de modo a constatar se o valor da resistência à compressão uniaxial seria inferior, ou teria tendência a estabilizar, neste tipo de granitos.

## BIBLIOGRAFIA

Almeida, P.(2005) “*Deformação em comportamento frágil na região da Serra da Estrela*”, Dissertação apresentada para obtenção do grau Doutor em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior, Covilhã

Bandis, S. (1990). “*Mechanical properties of rock joints*”. Proc. Int. Soc. Rock Mech.Symp. on rock joints. Loen, Noruega, pp. 125-140.

Bieniawski, Z.T., (1969). “*In Situ Large Scale Testing of Coal.Proceedings of a Conference held by The British Geotechnical Society in London*”. London. 13-15 May

Boguka, J., Debinski, J, Litewka, A., Mesquita, A.B. (1998), “*Experimental verification of mathematical model for oriented damage of concrete*”, Mecânica experimental, pp11-18. Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. LNEC, Lisboa, Portugal

Brown ET., (1981), “*Suggested methods for determining the strength of rock materials in uniaxial compression*”. In: Brown ET, editor. Rock characterization, testing and monitoring ð ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon Press.

Bristish Standart Institution – B.S.I., (1986), “*Testing Concrete*”, BS 1881, part 203: “*Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*”

Caldeira, L., (2005), *2Metodologias de análise de risco. Aplicações em Geotecnia.* 2.<sup>as</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia. LNEC, Lisboa, 29 e 30 de Setembro. 25p.

Cardoso, A., (2004), “*Modelação e segurança*”. Conferência temática. 9.º Congresso Nacional de Geotecnia. Aveiro.

Cavaleiro, V. M. P. (2001), “*Condicionantes geotécnicas à expansão do núcleo urbano da cidade da Covilhã*”, Dissertação apresentada para obtenção do grau de doutor, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Charrua-Graça, J.G., (1986), “*Heterogeneidade e efeito de Escala. Reflexos nas Segurança de Obras em Maciços Rochosos*”, LNEC, Lisboa

Cunha, A.P. e Muralha, A. 1990. “*Scale effects in the mechanical behaviour of joints and rock masses*”. LNEC, memória n.º 763, Lisboa.

Costa, M. (2001), “*critérios para a caracterização geotécnica de maciços Rochosos para obras subterrâneas*”, Congresso de Engenheiros, Ordem dos Engenheiros, Vidago.

Evangelista, A. C. J. (2002) – Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. Tese doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE. 219p. Brasil.

Ferreira, P.(2000) “*Alteração e alterabilidade das rochas implicações em obras de engenharia*”, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Coimbra

H.Grube, H. & Lawrence C.D. (1984), “*Permeability of Concrete to Oxygen*” Proceedings of Rilem Seminar, Durability of Concrete Structures Under Normal Outdoor Exposure, University of Hanover, Institute fur Baustoffkunde und Materialprufung, pp 68-79.

Goodman, R.E. (1989). “*Introduction to Rock Mechanics*”. New York: John Wiley & Sons, 562p.

Hoek,E. & Brown, E.T., (1980), “Empirical Strength Criterion for Rock Masses”, J. Geotech. Eng.Div., Am.Soc.Civ.Eng.106. In Franklin (1993).

Hoek, E., Carranza-Torres, C.; Corkum, B., (2002). “*Hoek-Brown Failure Criterium –2002 Edition*”. North American Rock Mechanics Society, Toronto.

I.S.R.M. (1978), “*Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials.*” International Society for Rock Mechanics. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Anstr. Vol 16, pp. 135-140, Pregamon. Grã Bretanha.

I.S.R.M. (1978), “*Suggested methods for determining sound velocity.*” International Society for Rock Mechanics. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Anstr. Vol 15, pp. 53-58, Pregamon. Grã Bretanha.

Jackson, R. & Lau, J.S., (1990), "The effect of specimen size on the mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite", Proceedings 1<sup>st</sup> Int. Workshop Scale Effects in Rock Masses. Loen, Norway. ed. Pinto da Cunha. Balkema. Rotterdam. In Derek Martin, C. & Simmons, G.R., (1993).

Ladeira, F. L., (1986), "*Curso de extensão Universitária em estabilidade de Taludes*", Universidade de Aveiro, Aveiro.

Liang, M. T., Wu, J. (2002) – Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures. Cement and concrete research 32, pp. 1763-1769. Pergamon, Elsevier.

Matilde M.H., (2000), "*O contributo dos ensaios laboratoriais de compressão uniaxial para o projecto de explorações subterrâneas de mármore*", Revista INGENIUM N.º 46, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Mello Mendes, F. & Ojima, L. M., (1982), "*Geotechnical Rock Mass Classifications Applicable to Tunnel Design and Construction*". Proceedings of the IV Congress International Association of Engineering Geology. Vol. V. New Delhi.

Mello Mendes, F., (1985), "*Geomecânica Aplicada à Exploração Mineira Subterrânea*." Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Hidromineira, Consultores de Minas e Geomecânica, Lda. Lisboa.

Miranda, T. (2003). "*Contribuição para a Obtenção de Parâmetros Geomecânicos para a Modelação de Obras Subterrâneas em Maciços Graníticos*." Tese de Mestrado. UM, Guimarães, 186p.

Miranda, T. et al, (2006). "*Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciços Heterogéneos*". Publicação 25, 2006, Universidade do Minho, Guimarães.

Muralha, J.(1995) "Abordagem probabilística do comportamento mecânico de descontinuidades de maciços rochosos", Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC, Lisboa

Pundit Manual, (1994), C.N.S., Instruments. E.L.E. International Ltd., Londres

Rocha, M., 1971, "*Mecânica das Rochas*". LNEC, Lisboa.

Sheorey, P.R. (1993), "*Design of Coal Pillar Arrays and Chain Pillars. Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice, Practice & Projects*". Ed. Por Hudson. Vol2. Pergamon.

Taioli, F. (1999), "*Comportamento elástico dinâmico da formação São Paulo*". Revista Brasileira de Geociências vol.29, pp 657-662. Brasil

UBI, 2004, "*Sebenta de Mecânica das Rochas*", Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Vallejo, L. I.G., *et al*, (2002), *Ingeniería Geológica*, Madrid.

Wyllie, D. (1992). "*Foundations on rock*". E & FN, Spon.

# ANEXOS

## Anexos

### Índice

Anexo I – Tabelas de cálculo das propriedades físicas: densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Tabela 1 – Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (A) .....	4
Tabela 2 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (B) .....	4
Tabela 3 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (C) .....	5
Tabela 4 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (D) .....	5
Tabela 5 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (E) .....	6
Tabela 6 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (F) .....	6
Tabela 7 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (G) .....	7
Tabela 8 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (H) .....	7
Tabela 9 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (I) .....	8
Tabela 10 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (J) .....	8
Tabela 11 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R1) .....	9
Tabela 12 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R1.5) .....	9
Tabela 13 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R2) .....	10
Tabela 14 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R2.5) .....	10
Tabela 15 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R3) .....	11
Tabela 16 – Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (A) .....	13
Tabela 17 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (B) .....	13
Tabela 18 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (C) .....	14
Tabela 19 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (D) .....	14
Tabela 20 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (E) .....	15
Tabela 21 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (F) .....	15
Tabela 22 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (G) .....	16
Tabela 23 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (H) .....	16
Tabela 24 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (I) .....	17
Tabela 25 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassónicas dos provetes do grupo (J) .....	17

Tabela 26 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R1) .....	18
Tabela 27 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R1.5) .....	18
Tabela 28 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R2) .....	19
Tabela 29 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R2.5) .....	19
Tabela 30 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R3) .....	20
Tabela 31 – Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (A) .....	22
Tabela 32 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (B) .....	22
Tabela 33 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (C) .....	23
Tabela 34 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (D) .....	23
Tabela 35 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (E).....	24
Tabela 36 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (F).....	24
Tabela 37 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (G) .....	25
Tabela 38 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (H) .....	25
Tabela 39 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (I).....	26
Tabela 40 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (J) .....	26
Tabela 41 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R1) .....	27
Tabela 42 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R1.5) ....	27
Tabela 43 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R2) .....	28
Tabela 44 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R2.5) ....	28
Tabela 45 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R3) .....	29

Anexo II – Tabelas de cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas

Anexo III – Tabelas de cálculo da resistência à compressão uniaxial

## Anexo I

Tabelas de cálculo das propriedades físicas: densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.

Nº Provetes Grupo A	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
A_1	50	50	50	25.92	0.43	1.12
A_2	50	50	50	26.01	0.58	1.52
A_3	50	50	50	26.16	0.36	0.95
A_4	50	50	50	26.32	0.13	0.35
A_5	50	50	50	25.98	0.46	1.19
A_6	50	50	50	26.15	0.49	1.27
A_7	50	50	50	26.19	0.41	1.08
A_8	50	50	50	26.18	0.37	0.96
A_9	50	50	50	26.17	0.37	0.98
A_10	50	50	50	26.29	0.23	0.60
<b>Média</b>				26.14	0.38	1.00
<b>Desvio Padrão</b>				0.13	0.13	0.33
<b>Valor Máximo</b>				26.32	0.58	1.52
<b>Valor Mínimo</b>				25.92	0.13	0.35

Tabela 1 – Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (A)

Nº Provetes Grupo B	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
B_1	100	50	50	25.94	0.43	1.13
B_2	100	50	50	25.97	0.42	1.08
B_3	100	50	50	26.06	0.30	0.77
B_4	100	50	50	25.96	0.42	1.10
B_5	100	50	50	26.04	0.38	0.99
B_6	100	50	50	26.64	0.37	1.00
B_7	100	50	50	26.20	0.38	0.99
B_8	100	50	50	26.19	0.39	1.02
B_9	100	50	50	26.21	0.41	1.07
B_10	100	50	50	26.21	0.36	0.95
B_11	100	50	50	26.23	0.37	0.97
<b>Média</b>				26.14	0.39	1.01
<b>Desvio Padrão</b>				0.21	0.04	0.10
<b>Valor Máximo</b>				26.64	0.43	1.13
<b>Valor Mínimo</b>				25.94	0.30	0.77

Tabela 2 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (B)

Nº Provetes Grupo C	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
C_1	125	50	50	25.91	0.42	1.10
C_2	125	50	50	25.95	0.43	1.01
C_3	125	50	50	25.95	0.38	1.00
C_4	125	50	50	25.95	0.39	1.04
C_5	125	50	50	25.88	0.38	1.02
C_6	125	50	50	26.23	0.37	1.02
C_7	125	50	50	26.23	0.36	0.05
C_8	125	50	50	26.19	0.39	0.05
C_9	125	50	50	26.21	0.38	1.00
C_10	125	50	50	26.22	0.39	1.01
C_11	125	50	50	26.23	0.39	1.02
<b>Média</b>				26.07	0.39	0.83
<b>Desvio Padrão</b>				0.15	0.02	0.41
<b>Valor Máximo</b>				26.23	0.43	1.10
<b>Valor Mínimo</b>				25.88	0.36	0.05

Tabela 3 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (C)

Nº Provetes Grupo D	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
D_1	150	50	50	25.39	0.39	1.00
D_2	150	50	50	25.84	0.39	1.01
D_3	150	50	50	25.83	0.39	1.02
D_4	150	50	50	25.88	0.38	0.98
D_5	150	50	50	25.81	0.38	0.99
D_6	150	50	50	26.22	0.36	0.94
D_7	150	50	50	26.23	0.35	0.91
D_8	150	50	50	26.22	0.36	0.95
D_9	150	50	50	26.24	0.34	0.89
D_10	150	50	50	26.24	0.34	0.89
<b>Média</b>				25.99	0.37	0.96
<b>Desvio Padrão</b>				0.29	0.02	0.05
<b>Valor Máximo</b>				26.24	0.39	1.02
<b>Valor Mínimo</b>				25.39	0.34	0.89

Tabela 4 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (D)

Nº Provetes Grupo E	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
E_1	70	70	70	26.23	0.30	0.78
E_2	70	70	70	26.25	0.27	0.72
E_3	70	70	70	26.26	0.29	0.77
E_4	70	70	70	26.26	0.29	0.76
E_5	70	70	70	26.24	0.31	0.82
E_6	70	70	70	26.22	0.37	0.97
E_7	70	70	70	26.22	0.37	0.96
E_8	70	70	70	26.19	0.38	0.99
E_9	70	70	70	26.20	0.38	1.00
E_10	70	70	70	26.19	0.37	0.96
<b>Média</b>				26.23	0.33	0.87
<b>Desvio Padrão</b>				0.03	0.04	0.11
<b>Valor Máximo</b>				26.26	0.38	1.00
<b>Valor Mínimo</b>				26.19	0.27	0.72

Tabela 5 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (E)

Nº Provetes Grupo F	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
F_1	140	70	70	26.14	0.47	1.22
F_2	140	70	70	26.20	0.39	1.02
F_3	140	70	70	24.85	0.38	0.94
F_4	140	70	70	25.99	0.36	0.94
F_5	140	70	70	26.00	0.36	0.94
F_6	140	70	70	26.20	0.37	0.96
F_7	140	70	70	26.17	0.38	0.99
F_8	140	70	70	26.22	0.37	0.97
F_9	140	70	70	26.18	0.38	0.99
F_10	140	70	70	26.24	0.36	0.96
<b>Média</b>				26.02	0.38	0.99
<b>Desvio Padrão</b>				0.42	0.03	0.09
<b>Valor Máximo</b>				26.24	0.47	1.22
<b>Valor Mínimo</b>				24.85	0.36	0.94

Tabela 6 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (F)

Nº Provetes Grupo G	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
G_1	210	70	70	26.19	0.40	1.05
G_2	210	70	70	26.22	0.37	0.96
G_3	210	70	70	26.21	0.35	0.91
G_4	210	70	70	26.23	0.30	0.80
G_5	210	70	70	26.21	0.33	0.86
G_6	210	70	70	26.25	0.29	0.75
G_7	210	70	70	26.23	0.30	0.79
G_8	210	70	70	26.23	0.29	0.75
G_9	210	70	70	26.24	0.28	0.72
G_10	210	70	70	26.22	0.31	0.80
<b>Média</b>				26.22	0.32	0.84
<b>Desvio Padrão</b>				0.02	0.04	0.10
<b>Valor Máximo</b>				26.25	0.40	1.05
<b>Valor Mínimo</b>				26.19	0.28	0.72

Tabela 7 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (G)

Nº Provetes Grupo H	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
H_1	100	100	100	26.21	0.33	0.86
H_2	100	100	100	26.20	0.36	0.95
H_3	100	100	100	26.19	0.41	1.08
H_4	100	100	100	26.19	0.42	1.10
H_5	100	100	100	26.19	0.41	1.07
H_6	100	100	100	26.15	0.42	1.11
H_7	100	100	100	26.17	0.41	1.09
H_8	100	100	100	26.20	0.39	1.03
H_9	100	100	100	26.18	0.40	1.04
H_10	100	100	100	26.16	0.42	1.09
H_11	100	100	100	26.19	0.41	1.08
<b>Média</b>				26.18	0.40	1.04
<b>Desvio Padrão</b>				0.02	0.03	0.08
<b>Valor Máximo</b>				26.21	0.42	1.11
<b>Valor Mínimo</b>				26.15	0.33	0.86

Tabela 8 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (H)

Nº Provetes Grupo I	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
I_1	150	100	100	26.18	0.41	1.08
I_2	150	100	100	26.20	0.37	0.98
I_3	150	100	100	26.19	0.40	1.05
I_4	150	100	100	26.23	0.35	0.93
I_5	150	100	100	26.22	0.37	0.96
I_6	150	100	100	26.21	0.33	0.87
I_7	150	100	100	26.19	0.36	0.96
I_8	150	100	100	26.20	0.35	0.91
I_9	150	100	100	26.20	0.34	0.90
I_10	150	100	100	26.21	0.34	0.88
<b>Média</b>				26.20	0.36	0.95
<b>Desvio Padrão</b>				0.01	0.03	0.07
<b>Valor Máximo</b>				26.23	0.41	1.08
<b>Valor Mínimo</b>				26.18	0.33	0.87

Tabela 9 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (I)

Nº Provetes Grupo J	Dimensões [mm]			Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D				
J_1	200	100	100	26.15	0.43	1.14
J_2	200	100	100	26.17	0.42	1.10
J_3	200	100	100	26.18	0.42	1.10
J_4	200	100	100	26.17	0.41	1.09
J_5	200	100	100	26.22	0.43	1.13
J_6	200	100	100	26.18	0.39	1.03
J_7	200	100	100	26.34	0.35	0.93
J_8	200	100	100	26.21	0.42	1.10
J_9	200	100	100	26.17	0.40	1.06
J_10	200	100	100	26.17	0.39	1.01
<b>Média</b>				26.20	0.41	1.07
<b>Desvio Padrão</b>				0.05	0.02	0.06
<b>Valor Máximo</b>				26.34	0.43	1.14
<b>Valor Mínimo</b>				26.15	0.35	0.93

Tabela 10 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (J)

Nº Provetes Grupo R1	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
1_R1	63	63	26.37	0.14	0.37
2_R1	63	63	26.30	0.17	0.44
3_R1	63	63	26.34	0.16	0.42
4_R1	63	63	26.33	0.15	0.41
5_R1	63	63	26.34	0.14	0.38
<b>Média</b>			26.33	0.15	0.40
<b>Desvio Padrão</b>			0.03	0.01	0.03
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.17	0.44
<b>Valor Mínimo</b>			26.30	0.14	0.37

Tabela 11 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R1)

Nº Provetes Grupo R1.5	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
1_R1.5	95	63	26.37	0.16	0.42
2_R1.5	95	63	26.36	0.13	0.35
3_R1.5	95	63	26.37	0.14	0.38
4_R1.5	95	63	26.35	0.13	0.34
5_R1.5	95	63	26.35	0.14	0.38
<b>Média</b>			26.36	0.14	0.37
<b>Desvio Padrão</b>			0.01	0.01	0.03
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.16	0.42
<b>Valor Mínimo</b>			26.35	0.13	0.34

Tabela 12 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R1.5)

Nº Provetes Grupo R2	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
1_R2	126	63	26.37	0.15	0.40
2_R2	126	63	26.36	0.15	0.38
3_R2	126	63	26.32	0.17	0.45
4_R2	126	63	26.33	0.14	0.36
5_R2	126	63	26.34	0.13	0.33
<b>Média</b>			26.34	0.15	0.38
<b>Desvio Padrão</b>			0.02	0.02	0.05
<b>Valor Máximo</b>			26.37	0.17	0.45
<b>Valor Mínimo</b>			26.32	0.13	0.33

Tabela 13 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R2)

Nº Provetes Grupo R2.5	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
1_R2.5	158	63	26.39	0.21	0.55
3_R2.5	158	63	26.40	0.20	0.53
4_R2.5	158	63	26.33	0.23	0.61
5_R2.5	158	63	26.34	0.22	0.57
<b>Média</b>			26.37	0.21	0.57
<b>Desvio Padrão</b>			0.03	0.01	0.04
<b>Valor Máximo</b>			26.40	0.23	0.61
<b>Valor Mínimo</b>			26.33	0.20	0.53

Tabela 14 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R2.5)

Nº Provetes Grupo R3	Dimensões [mm]		Densidade aparente ( $\rho_a$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Absorção de água (A) [%]	Porosidade aberta ( $\eta$ ) [%]
	L	D			
1_R3	189	63	26.34	0.26	0.68
2_R3	189	63	26.39	0.21	0.56
3_R3	189	63	26.36	0.21	0.56
4_R3	189	63	26.29	0.14	0.37
5_R3	189	63	26.31	0.23	0.59
<b>Média</b>			26.34	0.21	0.55
<b>Desvio Padrão</b>			0.04	0.04	0.11
<b>Valor Máximo</b>			26.39	0.26	0.68
<b>Valor Mínimo</b>			26.29	0.14	0.37

Tabela 15 - Determinação das propriedades físicas para o grupo de provetes (R3)

## Anexo II

Tabelas de cálculo de velocidade de propagação das ondas  
ultrassónicas

Nº Provetes Grupo A	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
A_1	9.2	5380.4	9.7	4948.5	9.7	5103.1	11.4	4342.1	12.2	3934.4	12.5	3960.0
A_2	9.3	5268.8	8.6	5130.8	9.0	5500.0	11.8	4152.5	11.5	3837.0	11.9	4159.7
A_3	8.1	5293.2	9.5	4947.4	9.2	5122.3	9.8	4375.0	12.1	3884.3	11.8	3993.6
A_4	9.5	5157.9	9.9	5050.5	9.4	5199.5	11.9	4117.6	13.2	3787.9	11.7	4177.4
A_5	9.9	5227.3	9.2	5013.6	9.2	5108.7	12.4	4173.4	12.1	3812.0	11.3	4159.3
A_6	9.1	5192.3	9.5	5118.4	8.8	5085.2	11.0	4295.5	12.0	4052.1	11.2	3995.5
A_7	9.5	5302.6	8.7	5316.1	9.4	5133.0	12.2	4129.1	12.1	3822.3	12.3	3922.8
A_8	9.2	5244.6	9.4	5252.7	9.1	5357.1	12.0	4020.8	11.9	4149.2	11.4	4276.3
A_9	9.4	5212.8	8.9	5547.8	8.8	5340.9	12.0	4083.3	11.1	4448.2	10.8	4351.9
A_10	9.5	5131.6	9.2	5407.6	9.4	5146.3	11.9	4096.6	12.4	4012.1	11.8	4099.6
<b>Média</b>		5241.1	---	5173.3	---	5209.6	---	4178.6	---	3973.9	---	4109.6
<b>Desvio Padrão</b>		73.8	---	202.4	---	140.6	---	118.6	---	204.2	---	141.4
<b>Valor Máximo</b>		5380.4	---	5547.8	---	5500.0	---	4375.0	---	4448.2	---	4351.9
<b>Valor Mínimo</b>		5131.6	---	4947.4	---	5085.2	---	4020.8	---	3787.9	---	3922.8

Tabela 16 – Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (A)

Nº Provetes Grupo B	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
B_1	20.0	5237.5	9.6	5143.2	9.4	5305.9	26.4	3967.8	12.3	4014.2	11.9	4191.2
B_2	19.8	5202.0	9.7	5038.7	9.4	5305.9	26.0	3961.5	12.0	4072.9	11.8	4226.7
B_3	19.4	5386.6	9.6	5169.3	9.3	5362.9	24.8	4213.7	12.3	4034.6	11.5	4337.0
B_4	19.6	5204.1	9.5	5065.8	9.6	5208.3	25.5	4000.0	12.2	3944.7	12.1	4132.2
B_5	19.9	5232.4	9.3	5362.9	9.8	4936.2	25.0	4165.0	12.4	4022.2	11.9	4065.1
B_6	20.0	4950.0	9.9	5101.0	9.9	4987.4	24.0	4125.0	12.0	4208.3	12.1	4080.6
B_7	21.1	4940.8	9.6	5182.3	9.7	5038.7	25.3	4120.6	11.5	4326.1	11.9	4107.1
B_8	20.8	4909.9	9.6	5208.3	9.7	4961.3	25.0	4085.0	11.3	4424.8	11.8	4078.4
B_9	20.1	5174.1	9.5	5263.2	9.6	5091.1	26.7	3895.1	12.0	4166.7	12.4	3941.5
B_10	20.1	5186.6	9.7	5077.3	9.5	5263.2	26.8	3889.9	12.1	4070.2	12.1	4132.2
B_11	19.6	5197.7	9.7	5038.7	9.6	5208.3	25.4	4010.8	12.2	4006.1	11.4	4386.0
<b>Média</b>		5147.4	---	5150.1	---	5151.7	---	4039.5	---	4117.3	---	4152.5
<b>Desvio Padrão</b>		148.9	---	101.3	---	154.0	---	109.0	---	148.9	---	127.0
<b>Valor Máximo</b>		5386.6	---	5362.9	---	5362.9	---	4213.7	---	4424.8	---	4337.0
<b>Valor Mínimo</b>		4909.9	---	5038.7	---	4936.2	---	3889.9	---	3944.7	---	3941.5

Tabela 17 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (B)

Nº Provetes Grupo C	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
C_1	24.1	5181.5	9.5	5315.8	9.5	5144.7	31.4	3976.9	11.7	4316.2	12.3	3973.6
C_2	25.0	5015.0	9.8	5267.9	9.7	5257.7	32.4	3869.6	12.1	4266.5	12.0	4250.0
C_3	26.7	4733.1	9.9	5202.0	10.1	5160.9	32.1	3936.9	11.8	4364.4	12.2	4272.5
C_4	26.4	4772.7	9.9	5214.6	9.9	5252.5	31.8	3962.3	12.0	4302.1	12.3	4227.6
C_5	28.0	4508.9	9.7	5360.8	9.6	5351.6	33.7	3746.3	12.4	4193.5	12.1	4245.9
C_6	26.2	4794.8	9.7	5360.8	9.8	5229.6	31.5	3988.1	11.4	4561.4	11.4	4495.6
C_7	25.8	4864.3	10.0	5162.5	9.9	5252.5	31.1	4035.4	11.2	4609.4	11.0	4727.3
C_8	25.0	4905.0	9.4	5372.3	9.8	5153.1	31.8	3856.1	12.5	4040.0	12.3	4105.7
C_9	24.9	5070.3	9.7	5335.1	9.8	5306.1	31.4	4020.7	11.1	4662.2	11.3	4601.8
C_10	24.8	5065.5	9.9	5214.6	10.1	5148.5	31.2	4026.4	11.2	4609.4	12.6	4127.0
C_11	26.2	4794.8	10.0	5087.5	10.1	5037.1	31.5	3988.1	12.0	4239.6	11.8	4311.4
<b>Média</b>	4882.4	---	5263.1	---	5208.6	---	3946.1	---	4378.6	---	4303.5	
<b>Desvio Padrão</b>	191.3	---	94.0	---	88.9	---	88.7	---	202.7	---	223.1	
<b>Valor Máximo</b>	5181.5	---	5372.3	---	5351.6	---	4035.4	---	4662.2	---	4727.3	
<b>Valor Mínimo</b>	4508.9	---	5162.5	---	5144.7	---	3746.3	---	4040.0	---	3973.6	

Tabela 18 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (C)

Nº Provetes Grupo D	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
D_1	29.6	5084.5	10.2	5281.9	10.4	5000.0	35.6	4227.5	12.3	4380.1	12.9	4031.0
D_2	29.1	5171.8	10.2	5159.3	9.6	5429.7	37.2	4045.7	13.0	4048.1	11.9	4380.3
D_3	29.3	5140.8	10.4	5084.1	10.2	5196.1	39.4	3823.0	12.9	4098.8	12.2	4344.3
D_4	29.1	5167.5	10.3	5109.2	10.0	5387.5	40.3	3731.4	13.2	3986.7	12.4	4344.8
D_5	29.1	5180.4	10.3	5036.4	10.2	5110.3	40.2	3750.0	12.9	4021.3	12.0	4343.8
D_6	30.9	4858.4	10.3	5145.6	10.2	5269.6	37.2	4035.6	13.4	3955.2	12.3	4369.9
D_7	31.1	4847.3	9.9	5277.8	10.1	5148.5	40.4	3731.4	12.4	4213.7	13.0	4000.0
D_8	29.3	5123.7	10.1	5297.0	10.5	5131.0	37.8	3971.6	12.4	4314.5	13.5	3990.7
D_9	31.1	4839.2	9.9	5303.0	10.1	5123.8	40.6	3706.9	12.0	4375.0	12.9	4011.6
D_10	29.1	5171.8	9.9	5340.9	10.0	5250.0	40.3	3734.5	12.2	4334.0	13.6	3860.3
<b>Média</b>	5058.5	---	5203.5	---	5204.6	---	3875.8	---	4172.8	---	4167.7	
<b>Desvio Padrão</b>	147.9	---	108.3	---	131.8	---	181.4	---	169.2	---	204.6	
<b>Valor Máximo</b>	5180.4	---	5340.9	---	5429.7	---	4227.5	---	4380.1	---	4380.3	
<b>Valor Mínimo</b>	4839.2	---	5036.4	---	5000.0	---	3706.9	---	3955.2	---	3860.3	

Tabela 19 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (D)

Nº Provetes Grupo E	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
E_1	14.0	5062.5	13.5	5259.3	13.5	5277.8	16.9	4193.8	17.1	4152.0	17.0	4191.2
E_2	13.4	5354.5	14.1	5026.6	14.1	5248.2	16.8	4270.8	17.8	3981.7	16.9	4378.7
E_3	13.0	5346.2	13.1	5353.1	12.7	5472.4	16.4	4237.8	15.7	4466.6	15.1	4602.6
E_4	13.1	5496.2	15.2	4745.1	12.9	5513.6	15.8	4557.0	16.8	4293.2	15.1	4710.3
E_5	13.0	5548.1	13.8	5190.2	13.1	5458.0	15.7	4593.9	17.0	4213.2	15.6	4583.3
E_6	12.7	5561.0	12.8	5459.0	13.0	5307.7	15.3	4616.0	15.8	4422.5	16.8	4107.1
E_7	13.1	5381.7	13.5	5351.9	12.7	5502.0	15.8	4462.0	17.6	4105.1	14.3	4886.4
E_8	13.1	5486.6	13.9	5242.8	13.2	5473.5	15.8	4549.1	17.2	4236.9	15.2	4753.3
E_9	12.9	5455.4	12.7	5580.7	13.1	5353.1	15.6	4511.2	15.5	4572.6	15.5	4524.2
E_10	13.0	5500.0	13.2	5539.8	13.6	5275.7	15.7	4554.1	16.4	4458.8	16.3	4401.8
<b>Média</b>		5419.2	---	5274.8	---	5388.2	---	4454.6	---	4290.3	---	4513.9
<b>Desvio Padrão</b>		146.5	---	249.5	---	105.4	---	158.8	---	186.8	---	246.7
<b>Valor Máximo</b>		5561.0	---	5580.7	---	5513.6	---	4616.0	---	4572.6	---	4886.4
<b>Valor Mínimo</b>		5062.5	---	4745.1	---	5248.2	---	4193.8	---	3981.7	---	4107.1

Tabela 20 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (E)

Nº Provetes Grupo F	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
F_1	27.2	5151.7	13.5	5027.8	13.5	5268.5	32.8	4272.1	17.1	3969.3	16.2	4390.4
F_2	27.0	5148.1	13.0	5336.5	13.5	5037.0	34.0	4088.2	15.7	4418.8	17.3	3930.6
F_3	26.9	5213.8	13.3	5263.2	13.6	5064.3	34.3	4088.9	15.9	4402.5	17.2	4004.4
F_4	27.1	5203.0	13.6	5091.9	13.2	5284.1	32.7	4311.9	17.3	4002.9	15.9	4386.8
F_5	27.0	5194.4	13.7	5018.2	13.3	5338.3	34.3	4088.9	16.3	4217.8	16.0	4437.5
F_6	26.3	5308.9	13.0	5413.5	13.3	5188.0	33.1	4218.3	15.7	4482.5	16.6	4156.6
F_7	26.4	5298.3	12.8	5468.8	13.3	5169.2	33.4	4187.9	15.8	4430.4	16.7	4116.8
F_8	26.6	5239.7	13.2	5151.5	12.7	5462.6	32.1	4341.9	16.4	4146.3	15.4	4504.9
F_9	26.6	5300.8	13.0	5461.5	12.9	5203.5	32.1	4392.5	15.2	4671.1	15.6	4302.9
F_10	26.6	5277.3	13.0	5461.5	13.0	5182.7	32.1	4373.1	15.8	4493.7	16.1	4184.8
<b>Média</b>		5233.6	---	5269.4	---	5219.8	---	4236.4	---	4323.5	---	4241.6
<b>Desvio Padrão</b>		60.7	---	184.3	---	125.7	---	119.9	---	229.1	---	192.6
<b>Valor Máximo</b>		5308.9	---	5468.8	---	5462.6	---	4392.5	---	4671.1	---	4504.9
<b>Valor Mínimo</b>		5148.1	---	5018.2	---	5037.0	---	4088.2	---	3969.3	---	3930.6

Tabela 21 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (F)

Nº Provetes Grupo G	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
G_1	45.8	4587.9	13.8	5000.0	13.0	5375.0	55.0	3820.5	17.4	3965.5	16.1	4340.1
G_2	44.3	4751.7	13.4	5093.3	13.1	5257.6	57.4	3667.2	17.9	3812.8	16.1	4278.0
G_3	44.5	4719.1	13.1	5267.2	13.4	5084.0	57.6	3645.8	15.8	4367.1	16.9	4031.1
G_4	44.9	4693.8	13.4	5074.6	13.1	5305.3	54.0	3902.8	16.9	4023.7	15.8	4398.7
G_5	45.0	4666.7	13.2	5066.3	13.3	5263.2	54.1	3881.7	16.8	3980.7	16.0	4375.0
G_6	45.1	4661.9	13.2	5265.2	12.5	5520.0	54.2	3879.2	17.5	3971.4	15.8	4367.1
G_7	45.2	4670.9	13.5	5175.9	12.8	5341.8	54.4	3881.0	15.9	4394.7	16.9	4045.9
G_8	45.4	4653.1	13.2	5350.4	12.4	5352.8	54.6	3869.0	16.3	4332.8	16.5	4022.7
G_9	45.6	4619.0	13.4	5167.9	13.1	5229.0	54.8	3843.5	15.9	4355.3	17.1	4005.8
G_10	45.5	4640.1	13.0	5317.3	13.1	5305.3	54.6	3866.8	15.9	4347.5	17.4	3994.3
<b>Média</b>		4666.4	---	5177.8	---	5303.4	---	3825.7	---	4155.2	---	4185.9
<b>Desvio Padrão</b>		47.3	---	118.7	---	112.2	---	92.1	---	222.5	---	178.1
<b>Valor Máximo</b>		4751.7	---	5350.4	---	5520.0	---	3902.8	---	4394.7	---	4398.7
<b>Valor Mínimo</b>		4587.9	---	5000.0	---	5084.0	---	3645.8	---	3812.8	---	3994.3

Tabela 22 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (G)

Nº Provetes Grupo H	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
H_1	18.9	5211.6	18.0	5361.1	18.5	5385.1	24.5	4020.4	25.4	3799.2	24.5	4066.3
H_2	18.9	5231.5	18.6	5389.8	17.5	5500.0	24.9	3970.9	24.9	4026.1	24.5	3928.6
H_3	18.7	5340.9	19.1	5130.9	18.0	5388.9	23.8	4196.4	25.1	3904.4	23.2	4181.0
H_4	18.7	5347.6	17.8	5449.4	19.2	5195.3	24.2	4132.2	23.3	4163.1	26.0	3836.5
H_5	19.0	5263.2	19.2	5058.6	20.3	4778.3	25.5	3921.6	25.9	3750.0	23.2	4181.0
H_6	17.6	5497.2	18.8	5305.9	18.6	5349.5	22.5	4300.0	22.9	4355.9	25.0	3980.0
H_7	18.0	5395.8	18.5	5385.1	18.5	5270.3	23.4	4150.6	24.5	4066.3	24.2	4028.9
H_8	18.1	5359.1	18.9	5264.6	19.2	5156.3	23.2	4181.0	24.3	4094.7	24.2	4090.9
H_9	19.1	5242.1	18.5	5385.1	17.9	5419.0	24.3	4120.4	23.1	4312.8	21.4	4532.7
H_10	18.0	5333.3	19.3	5136.0	19.0	5263.2	22.8	4210.5	25.5	3887.3	24.3	4115.2
H_11	18.7	5347.6	18.1	5359.1	18.5	5229.7	23.9	4184.1	22.7	4273.1	25.5	3794.1
<b>Média</b>		5322.2	---	5286.7	---	5270.6	---	4120.4	---	4036.0	---	4094.1
<b>Desvio Padrão</b>		83.3	---	129.1	---	192.5	---	112.5	---	206.9	---	200.4
<b>Valor Máximo</b>		5497.2	---	5449.4	---	5500.0	---	4300.0	---	4355.9	---	4532.7
<b>Valor Mínimo</b>		5211.6	---	5058.6	---	4778.3	---	3921.6	---	3750.0	---	3836.5

Tabela 23 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (H)

Nº Provetes Grupo I	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
I_1	28.5	5285.1	18.9	5297.6	20.4	5067.4	34.4	4378.6	24.0	4171.9	24.7	4185.2
I_2	29.1	5154.6	21.0	4845.2	19.8	5075.8	37.5	4000.0	26.2	3883.6	26.4	3806.8
I_3	28.7	5209.1	18.9	5317.5	20.3	5092.4	34.6	4320.8	23.4	4294.9	24.7	4185.2
I_4	29.6	5087.8	21.1	4834.1	20.1	5074.6	37.5	4016.0	25.7	3968.9	26.0	3923.1
I_5	29.1	5146.0	21.2	4811.3	19.7	5076.1	37.6	3982.7	25.8	3953.5	27.0	3703.7
I_6	27.6	5439.3	20.2	5117.6	18.5	5425.7	35.7	4205.2	25.0	4135.0	23.9	4199.8
I_7	28.3	5340.1	19.2	5234.4	20.4	4993.9	36.5	4140.4	24.7	4068.8	25.8	3948.6
I_8	27.8	5436.2	19.0	5447.4	18.3	5464.5	35.4	4269.1	24.2	4276.9	23.4	4273.5
I_9	27.4	5483.6	18.5	5452.7	19.9	5213.6	33.0	4553.0	21.7	4648.6	26.5	3915.1
I_10	28.2	5354.6	18.5	5405.4	20.6	4951.5	36.6	4125.7	24.6	4065.0	26.1	3908.0
<b>Média</b>		5293.6	---	5176.3	---	5143.5	---	4199.2	---	4146.7	---	4004.9
<b>Desvio Padrão</b>		139.1	---	259.0	---	172.9	---	184.4	---	221.7	---	192.2
<b>Valor Máximo</b>		5483.6	---	5452.7	---	5464.5	---	4553.0	---	4648.6	---	4273.5
<b>Valor Mínimo</b>		5087.8	---	4811.3	---	4951.5	---	3982.7	---	3883.6	---	3703.7

Tabela 24 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (I)

Nº Provetes Grupo J	Provetes Secos - ONDAS P (Pundit P+S)						Provetes Secos - ONDAS S (Pundit P+S)					
	FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III		FACES I - I		FACES II - II		FACES III - III	
	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>P</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]	µs	V <sub>S</sub> [m/s]
J_1	40.8	4840.7	18.1	5317.7	19.4	5154.6	51.0	3872.5	25.3	3804.3	25.9	3861.0
J_2	39.6	5034.7	18.1	5359.1	18.7	5340.9	50.1	3979.5	22.9	4235.8	24.7	4043.5
J_3	39.9	4996.9	19.1	5229.1	18.5	5243.2	50.5	3948.0	23.4	4268.2	22.4	4330.4
J_4	38.6	5113.3	18.4	5271.7	19.0	5256.6	50.1	3939.6	22.8	4254.4	23.6	4232.0
J_5	38.2	5255.2	17.2	5523.3	18.3	5464.5	50.3	3991.1	22.7	4185.0	25.8	3876.0
J_6	38.3	5143.6	18.2	5329.7	19.0	5263.2	50.9	3870.3	23.6	4110.2	25.9	3861.0
J_7	38.3	5231.7	18.3	5491.8	19.9	5125.6	50.3	3983.6	22.4	4486.6	22.7	4493.4
J_8	38.8	5190.1	17.8	5540.7	18.4	5434.8	49.4	4076.4	23.5	4196.8	23.8	4201.7
J_9	37.9	5290.2	18.6	5215.1	19.3	5181.3	50.6	3962.5	23.1	4199.1	24.0	4166.7
J_10	38.7	5151.8	19.3	5181.3	19.3	5025.9	50.4	3955.9	23.4	4273.5	24.5	3959.2
<b>Média</b>		5124.8	---	5345.9	---	5249.1	---	3957.9	---	4201.4	---	4102.5
<b>Desvio Padrão</b>		136.0	---	131.4	---	136.7	---	59.3	---	170.4	---	217.9
<b>Valor Máximo</b>		5290.2	---	5540.7	---	5464.5	---	4076.4	---	4486.6	---	4493.4
<b>Valor Mínimo</b>		4840.7	---	5181.3	---	5025.9	---	3870.3	---	3804.3	---	3861.0

Tabela 25 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (J)

Provetes Secos				
Nº Provetes Grupo R1	ONDAS P (Pundit P+S)		ONDAS S (Pundit P+S)	
	Fases I - I		Fases I - I	
	$\mu\text{s}$	$V_p[\text{m/s}]$	$\mu\text{s}$	$V_s[\text{m/s}]$
1_R1	12.3	4959.3	21.6	2824.1
2_R1	12.9	4418.6	22.5	2533.3
3_R1	12.8	4765.6	22.2	2747.7
4_R1	13.2	4734.8	22.3	2802.7
5_R1	12.5	4760.0	21.7	2741.9
<b>Média</b>		4727.7	---	2730.0
<b>Desvio Padrão</b>		194.8	---	115.4
<b>Valor Máximo</b>		4959.3	---	2824.1
<b>Valor Mínimo</b>		4418.6	---	2533.3

Tabela 26 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R1)

Provetes Secos				
Nº Provetes Grupo R1.5	ONDAS P (Pundit P+S)		ONDAS S (Pundit P+S)	
	Fases I - I		Fases I - I	
	$\mu\text{s}$	$V_p[\text{m/s}]$	$\mu\text{s}$	$V_s[\text{m/s}]$
1_R1.5	24.3	4032.9	31.4	3121.0
2_R1.5	25.9	3861.0	33.6	2976.2
3_R1.5	25.1	3705.2	38.6	2409.3
4_R1.5	24.2	3843.0	31.4	2961.8
5_R1.5	24.3	3847.7	31.7	2949.5
<b>Média</b>		3858.0	---	2883.6
<b>Desvio Padrão</b>		116.5	---	274.0
<b>Valor Máximo</b>		4032.9	---	3121.0
<b>Valor Mínimo</b>		3705.2	---	2409.3

Tabela 27 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R1.5)

Provetes Secos				
Nº Provetes Grupo R2	ONDAS P (Pundit P+S)		ONDAS S (Pundit P+S)	
	Fases I - I		Fases I - I	
	$\mu\text{s}$	$V_p[\text{m/s}]$	$\mu\text{s}$	$V_s[\text{m/s}]$
1_R2	44.2	2907.2	55.1	2332.1
2_R2	44.4	2815.3	56.7	2204.6
3_R2	44.3	2866.8	55.8	2276.0
4_R2	45.1	2793.8	55.6	2266.2
5_R2	44.2	2850.7	54.3	2320.4
<b>Média</b>		2846.8	---	2279.9
<b>Desvio Padrão</b>		44.4	---	50.6
<b>Valor Máximo</b>		2907.2	---	2332.1
<b>Valor Mínimo</b>		2793.8	---	2204.6

Tabela 28 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R2)

Provetes Secos				
Nº Provetes Grupo R2.5	ONDAS P (Pundit P+S)		ONDAS S (Pundit P+S)	
	Fases I - I		Fases I - I	
	$\mu\text{s}$	$V_p[\text{m/s}]$	$\mu\text{s}$	$V_s[\text{m/s}]$
1_R2.5	37.1	4231.8	47.9	3277.7
3_R2.5	37.4	4197.9	48.5	3237.1
4_R2.5	37.5	4160.0	48.4	3223.1
5_R2.5	38.0	4276.3	48.7	3336.8
<b>Média</b>		4216.5	---	3268.7
<b>Desvio Padrão</b>		49.5	---	50.9
<b>Valor Máximo</b>		4276.3	---	3336.8
<b>Valor Mínimo</b>		4160.0	---	3223.1

Tabela 29 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R2.5)

Provetes Secos				
Nº Provetes Grupo R3	ONDAS P (Pundit P+S)		ONDAS S (Pundit P+S)	
	Fases I - I		Fases I - I	
	$\mu\text{s}$	$V_p[\text{m/s}]$	$\mu\text{s}$	$V_s[\text{m/s}]$
1_R3	56.7	3342.2	68.2	2778.6
2_R3	51.4	3686.8	68.0	2786.8
3_R3	52.6	3602.7	70.0	2707.1
4_R3	55.1	3457.4	69.1	2756.9
5_R3	57.4	3284.0	68.5	2751.8
<b>Média</b>		3474.6	---	2756.2
<b>Desvio Padrão</b>		170.0	---	31.1
<b>Valor Máximo</b>		3686.8	---	2786.8
<b>Valor Mínimo</b>		3284.0	---	2707.1

Tabela 30 - Cálculo de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos provetes do grupo (R3)

## Anexo III

Tabelas de cálculo da resistência à compressão uniaxial

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
A_1 (5x5x5)	25.00	363.5	145.4	0.3	20	II	sim
A_2 (5x5x5)	25.00	421.7	168.7	0.3	23	III	----
A_3 (5x5x5)	25.00	490.7	196.3	0.3	27	III	----
A_4 (5x5x5)	25.00	435.7	174.3	0.3	24	III	----
A_5 (5x5x5)	25.00	383.9	153.6	0.3	21	III	----
A_6 (5x5x5)	25.00	394.7	157.9	0.3	22	III	----
A_7 (5x5x5)	25.00	478.9	191.6	0.3	27	III	----
A_8 (5x5x5)	25.00	491.8	196.7	0.3	27	III	----
A_9 (5x5x5)	25.00	406.4	162.6	0.3	23	III	----
A_10 (5x5x5)	25.00	465.2	186.1	0.3	26	III	----
<b>Média A</b>	----	433.2	173.3	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	46.5	18.6	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	491.8	196.7	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	363.5	145.4	----	----	----	----

Tabela 31 – Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (A)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
B_1 (5x5x10)	25.00	367.9	147.2	0.3	20	I	----
B_2 (5x5x10)	25.00	362.4	145.0	0.3	20	I	----
B_3 (5x5x10)	25.00	370.0	148.0	0.3	21	I	----
B_4 (5x5x10)	25.00	382.5	153.0	0.3	21	I	----
B_5 (5x5x10)	25.00	369.8	147.9	0.3	21	I	----
B_6 (5x5x10)	25.00	364.0	145.6	0.3	20	I	----
B_7 (5x5x10)	25.00	386.7	154.7	0.3	21	I	----
B_8 (5x5x10)	25.00	382.6	153.1	0.3	21	I	----
B_9 (5x5x10)	25.00	402.7	161.1	0.3	22	I	sim
B_10 (5x5x10)	25.00	384.2	153.7	0.3	21	I	----
B_11 (5x5x10)	25.00	370.9	148.4	0.3	21	I	----
<b>Média B</b>	----	376.7	150.7	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	12.1	4.8	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	402.7	161.1	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	362.4	145.0	----	----	----	----

Tabela 32 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (B)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [mim]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
C_1 (5x5x12.5)	25.00	226.7	90.7	0.3	13	III	---
C_2 (5x5x12.5)	25.00	239.2	95.7	0.3	13	III	----
C_3 (5x5x12.5)	25.00	249.4	99.8	0.3	14	II	----
C_4 (5x5x12.5)	25.00	263.8	105.5	0.3	15	II	sim
C_5 (5x5x12.5)	25.00	211.9	84.7	0.3	12	II	----
C_6 (5x5x12.5)	25.00	248.5	99.4	0.3	14	III	----
C_7 (5x5x12.5)	25.00	327.5	131.0	0.3	18	I	----
C_8 (5x5x12.5)	25.00	250.1	100.0	0.3	14	II	----
C_9 (5x5x12.5)	25.00	263.9	105.5	0.3	15	III	----
C_10 (5x5x12.5)	25.00	324.5	129.8	0.3	18	I	----
C_11 (5x5x12.5)	25.00	242.0	96.8	0.3	13	III	
<b>Média C</b>	----	258.8	103.5	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	36.4	14.6	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	327.5	131.0	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	211.9	84.7	----	----	----	----

Tabela 33 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (C)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [mim]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
D_1 (5x5x15)	25.00	353.7	141.5	0.3	20	I	----
D_2 (5x5x15)	25.00	356.7	142.7	0.3	20	I	----
D_3 (5x5x15)	25.00	374.2	149.7	0.3	21	I	----
D_4 (5x5x15)	25.00	319.6	127.9	0.3	18	III	sim
D_5 (5x5x15)	25.00	370.0	148.0	0.3	21	I	----
D_6 (5x5x15)	25.00	354.0	141.6	0.3	20	III	----
D_7 (5x5x15)	25.00	338.0	135.2	0.3	19	III	----
D_8 (5x5x15)	25.00	372.0	148.8	0.3	21	III	----
D_9 (5x5x15)	25.00	358.2	143.3	0.3	20	III	----
D_10 (5x5x15)	25.00	304.7	121.9	0.3	17	III	----
<b>Média D</b>	----	350.1	140.0	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	22.9	9.2	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	374.2	149.7	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	319.6	127.9	----	----	----	----

Tabela 34 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (D)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
E_1 (7x7x7)	49.00	804.0	164.1	0.5	27	III	----
E_2 (7x7x7)	49.00	602.9	123.0	0.5	20	III	sim
E_3 (7x7x7)	49.00	709.0	144.7	0.5	24	III	----
E_4 (7x7x7)	49.00	822.1	167.8	0.5	27	III	----
E_5 (7x7x7)	49.00	879.4	179.5	0.5	29	I	----
E_6 (7x7x7)	49.00	771.5	157.4	0.5	26	I	----
E_7 (7x7x7)	49.00	699.3	142.7	0.5	23	I	----
E_8 (7x7x7)	49.00	649.9	132.6	0.5	22	I	----
E_9 (7x7x7)	49.00	885.5	180.7	0.5	30	III	----
E_10 (7x7x7)	49.00	678.1	138.4	0.5	23	III	----
<b>Média E</b>	----	750.2	153.1	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	97.0	19.8	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	885.5	180.7	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	602.9	123.0	----	----	----	----

Tabela 35 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (E)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
F_1 (7x7x14)	49.00	399.8	81.6	0.5	13	III	sim
F_2 (7x7x14)	49.00	483.2	98.6	0.5	16	I	----
F_3 (7x7x14)	49.00	419.6	85.6	0.5	14	III	----
F_4 (7x7x14)	49.00	561.5	114.6	0.5	19	III	----
F_5 (7x7x14)	49.00	566.7	115.6	0.5	19	III	----
F_6 (7x7x14)	49.00	438.2	89.4	0.5	15	II	----
F_7 (7x7x14)	49.00	464.9	94.9	0.5	15	II	----
F_8 (7x7x14)	49.00	445.1	90.8	0.5	15	III	----
F_9 (7x7x14)	49.00	520.7	106.3	0.5	17	III	----
F_10 (7x7x14)	49.00	429.6	87.7	0.5	14	III	----
<b>Média F</b>	----	472.9	96.5	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	58.8	12.0	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	566.7	115.6	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	399.8	81.6	----	----	----	----

Tabela 36 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (F)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
G_1 (7x7x21)	49.00	537.6	109.7	0.5	18	III	----
G_2 (7x7x21)	49.00	521.9	106.5	0.5	17	II	----
G_3 (7x7x21)	49.00	616.8	125.9	0.5	21	I	----
G_4 (7x7x21)	49.00	543.8	111.0	0.5	18	III	----
G_5 (7x7x21)	49.00	536.5	109.5	0.5	18	III	----
G_6 (7x7x21)	49.00	641.6	130.9	0.5	21	III	sim
G_7 (7x7x21)	49.00	517.2	105.6	0.5	17	III	----
G_8 (7x7x21)	49.00	615.9	125.7	0.5	21	I	----
G_9 (7x7x21)	49.00	548.1	111.9	0.5	18	III	----
G_10 (7x7x21)	49.00	663.5	135.4	0.5	22	I	----
<b>Média G</b>	----	574.3	117.2	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	54.2	11.1	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	641.6	130.9	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	517.2	105.6	----	----	----	----

Tabela 37 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (G)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
H_1 (10x10x10)	100.00	1457.3	145.7	1.0	24	III	----
H_2 (10x10x10)	100.00	1472.7	147.3	1.0	25	III	----
H_3 (10x10x10)	100.00	1505.4	150.5	1.0	25	III	----
H_4 (10x10x10)	100.00	1842.8	184.3	1.0	31	III	----
H_5 (10x10x10)	100.00	1505.5	150.6	1.0	25	III	----
H_6 (10x10x10)	100.00	1662.4	166.2	1.0	28	III	----
H_7 (10x10x10)	100.00	1605.0	160.5	1.0	27	III	sim
H_8 (10x10x10)	100.00	1743.1	174.3	1.0	29	I	----
H_9 (10x10x10)	100.00	1738.5	173.8	1.0	29	I	----
H_10 (10x10x10)	100.00	1527.4	152.7	1.0	25	I	----
H_11 (10x10x10)	100.00	1526.9	152.7	1.0	25	I	----
<b>Média H</b>	----	1598.8	159.9	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	129.4	12.9	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	1842.8	184.3	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	1457.3	145.7	----	----	----	----

Tabela 38 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (H)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensômetria
I_1 (10x10x15)	100.00	1256.7	125.7	1.0	21	III	----
I_2 (10x10x15)	100.00	1390.6	139.1	1.0	23	I	----
I_3 (10x10x15)	100.00	1377.4	137.7	1.0	23	I	----
I_4 (10x10x15)	100.00	1727.2	172.7	1.0	29	I	----
I_5 (10x10x15)	100.00	1520.6	152.1	1.0	25	III	----
I_6 (10x10x15)	100.00	1272.1	127.2	1.0	21	III	----
I_7 (10x10x15)	100.00	1253.1	125.3	1.0	21	III	----
I_8 (10x10x15)	100.00	1543.0	154.3	1.0	26	I	sim
I_9 (10x10x15)	100.00	1278.9	127.9	1.0	21	III	----
I_10 (10x10x15)	100.00	1351.0	135.1	1.0	23	III	----
<b>Média I</b>	----	1397.1	139.7	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	155.7	15.6	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	1727.2	172.7	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	1253.1	125.3	----	----	----	----

Tabela 39 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (I)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensômetria
J_1 (10x10x20)	100.00	1398.4	139.8	1.0	23	III	----
J_2 (10x10x20)	100.00	1550.4	155.0	1.0	26	III	----
J_3 (10x10x20)	100.00	1603.0	160.3	1.0	27	I	----
J_4 (10x10x20)	100.00	1441.0	144.1	1.0	24	III	----
J_5 (10x10x20)	100.00	1423.2	142.3	1.0	24	III	sim
J_6 (10x10x20)	100.00	1454.6	145.5	1.0	24	III	----
J_7 (10x10x20)	100.00	1405.7	140.6	1.0	23	III	----
J_8 (10x10x20)	100.00	1389.0	138.9	1.0	23	III	----
J_9 (10x10x20)	100.00	1532.0	153.2	1.0	26	I	----
J_10 (10x10x20)	100.00	1512.4	151.2	1.0	25	I	----
<b>Média J</b>	----	1471.0	147.1	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	73.7	7.4	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	1603.0	160.3	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	1389.0	138.9	----	----	----	----

Tabela 40 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (J)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
1_R1	31.17	372.5	119.5	0.3	21	II	----
2_R1	31.17	439.5	141.0	0.3	24	II	sim
3_R1	31.17	374.6	120.2	0.3	21	II	----
4_R1	31.17	369.4	118.5	0.3	21	II	----
5_R1	31.17	369.5	118.5	0.3	21	II	----
<b>Média R1</b>	----	385.1	123.5	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	30.5	9.8	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	439.5	141.0	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	369.4	118.5	----	----	----	----

Tabela 41 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R1)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
1_R1.5	31.17	236.2	75.8	0.3	13	III	----
2_R1.5	31.17	230.5	73.9	0.3	13	III	----
3_R1.5	31.17	259.0	83.1	0.3	14	III	sim
4_R1.5	31.17	219.2	70.3	0.3	12	III	----
5_R1.5	31.17	261.3	83.8	0.3	15	III	----
<b>Média R1.5</b>	----	241.2	77.4	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	18.3	5.9	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	261.3	83.8	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	219.2	70.3	----	----	----	----

Tabela 42 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R1.5)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
1_R2	31.17	253.6	81.4	0.3	14	III	----
2_R2	31.17	239.4	76.8	0.3	13	II	----
3_R2	31.17	254.3	81.6	0.3	14	III	sim
4_R2	31.17	290.1	93.1	0.3	16	III	----
5_R2	31.17	247.0	79.2	0.3	14	III	----
<b>Média R2</b>	----	256.9	82.4	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	19.5	6.3	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	290.1	93.1	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	239.4	76.8	----	----	----	----

Tabela 43 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R2)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
1_R2.5	31.17	287.8	92.3	0.3	16	III	----
3_R2.5	31.17	251.5	80.7	0.3	14	III	sim
4_R2.5	31.17	295.6	94.8	0.3	16	III	----
5_R2.5	31.17	260.2	83.5	0.3	14	III	----
<b>Média R2.5</b>	----	273.8	87.8	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	21.2	6.8	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	295.6	94.8	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	251.5	80.7	----	----	----	----

Tabela 44 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R2.5)

Provetes	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> máx [kN]	σ <sub>c</sub> [MPa] cálculo	Taxa de carga [kN/s]	Duração do ensaio [min]	Tipo de rotura	Ensaio com extensometria
1_R3	31.17	242.8	77.9	0.3	13	III	sim
2_R3	31.17	321.7	103.2	0.3	18	III	----
3_R3	31.17	261.1	83.8	0.3	15	III	----
4_R3	31.17	284.7	91.3	0.3	16	III	----
5_R3	31.17	336.7	108.0	0.3	19	III	----
<b>Média R3</b>	----	289.4	92.8	----	----	----	----
<b>Desvio Padrão</b>	----	39.6	12.7	----	----	----	----
<b>Valor Máximo</b>	----	336.7	108.0	----	----	----	----
<b>Valor Mínimo</b>	----	242.8	77.9	----	----	----	----

Tabela 45 - Determinação da resistência à compressão uniaxial dos provetes do grupo (R3)